ORIGEN DE LOS CELOS • MEJORA GENETICA DE CEREALES

INVESTIGACION y CIENCIA

OCTUBRE 2004
5,50 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

AMARRAS ELECTRODINAMICAS EN EL ESPACIO

BOMBAS ANTIBUNKER NUCLEARES

LA MUERTE DE LAS ESTRELLAS COMUNES

NANOSENSORES DE CAMPOS MAGNETICOS

CONTROL GENETICO DEL DESARROLLO DEL OJO

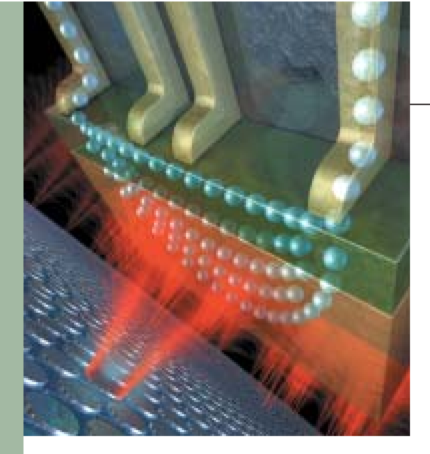




Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

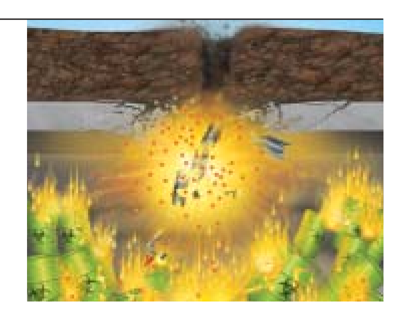
Octubre de 2004

Número 337





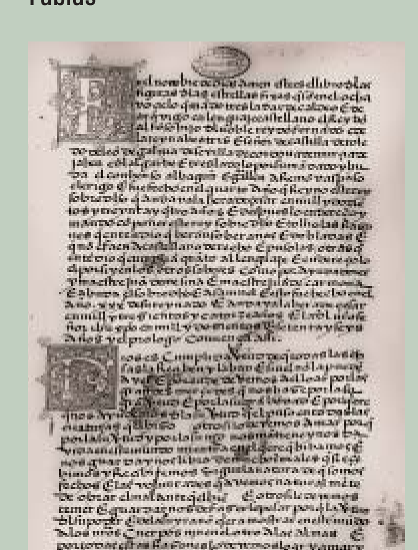














DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Felipe Cortés: *Mejora genética de cereales*; Alvar Sánchez Moreno: *Nanosensores de campos magnéticos*; Juan Sanmartín: *Amarras electrodinámicas en el espacio*; J. Vilardell: *Bombas antibúnker nucleares, Apuntes* y *Hace*; M.ª Rosa Zapatero Osorio: *La muerte de las estrellas comunes*; Luis Bou: *Las formas del espacio*; José M. García de la Mora: *Origen de los celos*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Alfred T. Kamajian

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	**Dos años**
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

PSICOLOGÍA ECONÓMICA. «La noción de 'saturación' del mercado se basa en anticuadas hipótesis psicológicas que, a su vez, parten de una analogía con los impulsos biológicos: si un animal, supongamos, tiene hambre, estará motivado para buscar comida; tras haber comido, el motivo desaparecerá. El concepto de saturación ha conducido a terribles predicciones acerca del futuro de la economía de EE.UU. (*véase ilustración*). Señalan algunos la gran proporción de familias estadounidenses que ya poseen artículos de entidad, por ejemplo un frigorífico (más del 80 por ciento), y aducen que en el futuro las ventas estarán mayormente limitadas a la reposición de lo que se gaste. Pero los móviles sociales son diferentes de los biológicos. Conseguir un objetivo conduce a pugnar por otro.»

LA ESTRUCTURA DEL ADN. «J. D. Watson y yo, en la Unidad del Consejo de Investigaciones Médicas en el Laboratorio Cavendish de Cambridge, estábamos convencidos de que podríamos acercarnos algo a la estructura del ADN construyendo modelos a escala basados en los patrones de rayos X obtenidos por M. H. F. Wilkins, Rosalind Franklin y sus colaboradores del King's College, de Londres. La hipótesis más importante que tuvimos que formular se refería a que la iteración cristalográfica no coincidiese con la repetición de las unidades químicas en la cadena, sino que se mostrara a intervalos mucho más largos. Una explicación posible era que todos los enlaces de la cadena eran iguales pero que los rayos X captaban cada décimo enlace, digamos, desde el mismo ángulo, y los demás enlaces desde ángulos diferentes. ¿Qué suerte de cadena podría producir un patrón así? La respuesta era fácil: la cadena podría estar arrollada en hélice. —F. H. C. Crick» (*Nota de la redacción: por este trabajo, Crick, Watson y Wilkins ganaron el premio Nobel en 1962.*)

...cien años

CAMBIO DE FUERZA MOTRIZ. «El vapor cae en desuso. La energía hidráulica avanza. El cambio se debe a la distribución de la electricidad. En centenares de pueblos y ciudades de todo el país, los motores de vapor han sido desplazados por la energía hidráulica transmitida eléctricamente. Así, por ejemplo, en Concord (New Hampshire), los talleres del ferrocarril que transporta todo el carbón que llega a la ciudadd trabajan mediante motores eléctricos de unos 550 caballos y la planta de vapor que antes hacía ese trabajo está parada. La energía eléctrica conseguida de la energía hidráulica está sustituyendo al vapor, no tanto porque sea más limpia, más segura y más higiénica para la salud, sino porque es más barata.»

...ciento cincuenta años

CAZA INVERNAL DE LA BALLENA. «Por los esquimales se enteraron los balleneros de que las ballenas recalaban en ciertas ensenadas del estrecho de Davis y de la bahía de Baffin, donde buscan abrigo durante el invierno. Esa información sugirió al capitán Penny la idea de organizar destacamentos que invernaran en las regiones polares para hacerse con el mayor número posible de ellas en el otoño y la primavera, extrayendo su aceite durante el invierno. Así pues, a tal fin se aprestaron dos naves que se hicieron a la vela en Aberdeen el 13 de agosto de 1853, con una tripulación de 33 marineros y tres grumetes. El éxito recompensó sus esfuerzos, pese a un frío de 40 grados bajo cero. La actividad desarrollada por los marineros contribuía a preservarles la salud, sin que a ninguno se le hicieran largos los días. Pero, por raro que pueda parecer, la letal plaga del cólera estalló entre los esquimales llevándose a muchos de ellos, mientras que los expedicionarios, sólo con leves síntomas premonitorios, quedaron exentos del morbo.»



Consumo hasta la saturación, el temor de los economistas. 1954.

TRENES BALA. «Recientemente, ante el Farmer's Club del Instituto Americano de Nueva York, el juez Meigs ha leído una ponencia en la que se afirmaba: 'El futuro conocerá ferrocarriles que seguirán una recta matemática entre parada y parada, raíles diez veces más robustos que los empleados hasta ahora, locomotoras con ruedas de un diámetro mucho mayor, digamos que de tres metros y medio a cuatro metros y medio; en vez de a ciento cincuenta kilómetros por hora, viajaremos, y con mayor seguridad, a cuatrocientos cincuenta kilómetros por hora.' Si el perímetro de las ruedas motrices fuera de 7 metros y medio (¡nada más y nada menos!), tendrían que girar a 1000 revoluciones por minuto. Como las ruedas no dan vueltas sin vapor, la caldera tendría que evaporar del orden de una tonelada de agua por minuto. ¿Cómo es posible evaporar esa cantidad de vapor en la caldera de una locomotora en ese intervalo de tiempo?»

PALEOANTROPOLOGIA

La vejez en la evolución humana

El número de seres humanos que sobrevivían hasta la vejez se multiplicó por más de cuatro hará unos 30.000 años. Unos antropólogos han examinado más de 750 muestras dentarias fósiles de homínidos pertenecientes a un período de millones de años, desde los australopitecos hasta los humanos modernos primitivos, pasando por los neandertales. Por vejez entienden haber llegado a una edad doble de la correspondiente a la madurez reproductiva (ésta suele coincidir con que salgan los terceros molares, lo que ocurre de ordinario en la adolescencia). Al calcular en los homínidos la proporción entre individuos viejos y jóvenes, descubrieron una tendencia al aumento de longevidad a medida que ascendían por el árbol evolutivo humano. En los humanos modernos, los adultos de más edad rebasaron en número a los más jóvenes por primera vez. Puede que el aumento de longevidad haya sido fundamental para el desarrollo de la cultura humana, donde los ancianos transmiten los conocimientos y facilitan la soldadura de sociedades complejas. *—Charles Choi*

ASTRONOMIA

Alrededor de Saturno

El 26 de octubre, la nave espacial Cassini se acercará por primera vez mucho a Titán, la luna de Saturno adonde la sonda Huygens, transportada por Cassini, descenderá en enero. A los pocos días de que entrase en órbita alrededor de Saturno efectuó una primera aproximación al satélite, pero se quedó a 320.000 kilómetros de Titán. En este nuevo acercamiento lo sobrevolará a sólo 1200 kilómetros de altura. Pero en sus tres primeros meses en órbita, la nave ha logrado ya varios descubrimientos. Ha hallado nuevas lunas de Saturno. Las dos primeras, anunciadas en agosto, se encuentran entre los satélites Mimas y Encélado, y su envergadura es sólo tres y cuatro kilómetros. Puede que el Voyager ya vislumbrara una de ellas. En septiembre se anunciaba el hallazgo de un cuerpo, o quizá dos, a mil kilómetros del borde exterior del fino y peculiar anillo F, uno de los más externos. De tratarse de un satélite y no de una concentración ocasional de materia, sería el número 34; mediría cuatro o cinco kilómetros y distaría menos de 300 kilómetros de la órbita de la luna Pandora. Ahora bien, al intentar precisar su órbita con nuevas imágenes, pareció que entraba en el anillo F. Esto sería extraño, así que cabe dentro de lo posible que se tratase de un segundo cuerpo. Al mismo tiempo se descubría un débil anillo asociado a la órbita de otra luna, Atlas. Se encuentra entre los anillos A y F; su ancho es de 200 kilómetros y se ignora si rodea por completo a Saturno. Cassini ha detectado también un nuevo cinturón de radiación, sobre las nubes más altas del planeta y el anillo D, y un halo luminoso que rodea a Titán, emitido por el metano y el monóxido de carbono de su atmósfera. Se esperaba verlo de día, excitados los gases por el Sol, pero ha sorprendido que resplandezca en el infrarrojo cercano durante la noche. Sorprendió también, fue uno de los primeros descubrimientos nada más entrar en órbita, una abundancia mayor de oxígeno en el borde de los anillos. Se cree que es el remanente de una colisión ocurrida quizás en enero de este mismo año.

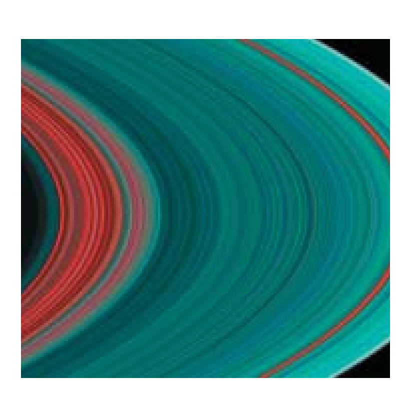
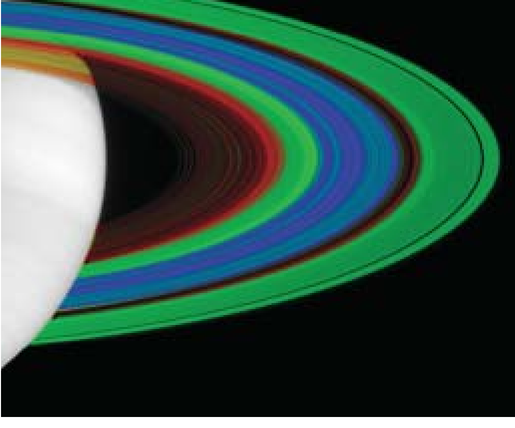


Imagen en falso color de parte de los anillos, vistos en el ultravioleta. El color turquesa indica mayor abundancia de partículas de hielo; el rojo, de partículas, más finas, de "suciedad". La gran franja turquesa es el anillo A; la fina línea roja hacia su exterior, la separación de Encke. Como se ve, hay más hielo hacia el borde externo. Hacia el interior, tras el anillo A y antes del B, se encuentra la división de Cassini, en rojo. Su abundante suciedad ha sorprendido. Recuerda al material de la luna Febe.



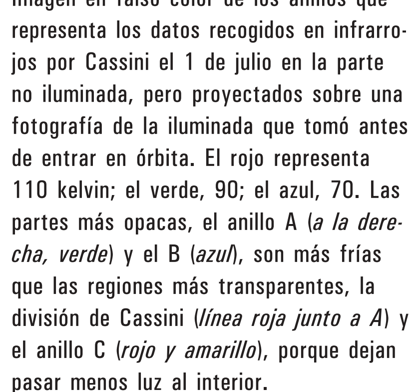


Imagen en falso color de los anillos que representa los datos recogidos en infrarrojos por Cassini el 1 de julio en la parte no iluminada, pero proyectados sobre una fotografía de la iluminada que tomó antes de entrar en órbita. El rojo representa 110 kelvin; el verde, 90; el azul, 70. Las partes más opacas, el anillo A (*a la derecha, verde*) y el B (*azul*), son más frías que las regiones más transparentes, la división de Cassini (*línea roja junto a A*) y el anillo C (*rojo y amarillo*), porque dejan pasar menos luz al interior.

NASA/JPL/*Universidad de Colorado (izquierda)*; NASA/JPL/GSFC/Ames (*derecha*)

OBESIDAD

Anticalóricos, pero menos

Quizá las bebidas con edulcorantes artificiales puedan alterar la percepción de la propia voracidad y, por tanto, no ayuden a adelgazar. O al menos así ha ocurrido con unas ratas de laboratorio. Ante la posibilidad de elegir entre líquidos aromatizados de muchas y pocas calorías, las ratas se muestran ávidas de sustancias más calóricas. Unos investigadores de la Universidad de Purdue alimentaron ratas con un líquido azucarado y otro endulzado con sacarina de cero calorías; confundían así la capacidad de los animales de asociar dulzor y calorías. Diez días después, tras probar un aperitivo de chocolate, esas mismas ratas engulleron más alimento que otro grupo de ratas de control que no habían probado nunca la sacarina. Asimismo, puede quebrarse el vínculo entre la viscosidad del alimento y la saciedad: las ratas que recibieron un suplemento de chocolate líquido ganaron más peso que las ratas a las que se ofreció una golosina de las mismas calorías, parecida a un pudin.

—J. R. Minkel



RICHARD HAMILTON SMITH *Corbis*

Dulces confusiones: ¿Dificultades para perder peso?

SIDA

¿El dinero no es el problema?

Una nota de prensa del DIO —departamento del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España patrocinado por la casa farmacéutica Pfizer— informaba en agosto de sus investigaciones acerca de la posible utilidad de las estatinas como fármaco contra el virus del sida. Una de las primeras frases del comunicado decía: "La terapia antirretroviral [...] no ha conseguido detener la expansión del VIH, sobre todo en países del Tercer Mundo con pocos recursos económicos. No obstante, el mayor problema [de esa terapia] no es el precio de los fármacos, que se ha reducido notablemente en los últimos años." A finales de 2003, por ejemplo, el precio de Combivir (AZT más lamivudina) se rebajó a sólo 0,60 dólares por día para los países más pobres; viene a ser lo que cuestan los genéricos del fabricante indio Cipla.

El monto de administrar antirretrovirales a todos los que lo necesitan en algunas de esas naciones, que antes quizá superase su producto interior bruto, con el resultado de millones de muertos, ha debido de quedarse en algunas centésimas de su riqueza nacional. Esta transferencia de fondos al primer mundo supondría, de todas formas, un esfuerzo decenas de veces mayor, en términos relativos, que el que han de hacer los países desarrollados para atender a sus propios enfermos, con los precios originales aún vigentes entre sus fronteras, o el que les llevaría cubrir las necesidades de los países más pobres con los nuevos precios. ONUSIDA preveía, en julio de este año, que la diferencia entre los recursos necesarios para extender el tratamiento y lo que se recaudará no dejará de crecer a lo largo del decenio. Y no todo son reducciones de precios. Se quintuplicó a finales del año pasado —sólo, eso sí, en EE.UU. y para seguros privados— el precio de Norvir, fármaco que ahora se usa para potenciar inhibidores de la proteasa más recientes. Necesitan nuevos antirretrovirales quienes no responden a los ya existentes. En 2003 se aprobaba Fuzeon, el primer inhibidor de la fusión del VIH (impide la entrada del virus en la célula). Su precio, 52 euros por día, ha causado consternación. Algunos programas públicos de EE.UU. no lo costean.

ENTOMOLOGIA

Nada como el hogar

Las hormigas del desierto del Sahara defienden con ferocidad sus moradas, pero a diferencia de otros animales territoriales, lo hacen, al parecer, porque se lo ordena su propio sistema de navegación. En las cercanías de sus hormigueros, los miembros de *Cataglyphis fortis* recurren a amenazas, mordiscos y rociadas de ácido venenoso contra los extraños. Pero cuando éstos se hallan a algo más de dos o tres metros de los hormigueros, la agresividad se desvanece. Markus Knaden y Rüdiger Wehner, de la Universidad de Zúrich, enseñaron a las hormigas a acudir a comederos situados 20 metros al norte de sus nidos. Las secuestraban justo cuando llegaban allá. Al soltarlas en un campo a kilómetros de distancia, inmediatamente corrieron 20 metros hacia el sur, donde creían que se hallaban sus hormigueros. Las hormigas que consumaban ese desplazamiento mostraban una probabilidad de iniciar una pelea tres veces mayor que aquellas a las que se detenía tras haber recorrido sólo cinco metros. Los investigadores conjeturan que un sistema de navegación inherente a las hormigas calcula distancias y controla su voluntad de lucha.

—Charles Choi

La hormiga del desierto, *Cataglyphis fortis*, está presta a entrar en combate cuando se halla cerca de su hormiguero.

EVA WEBER (*arriba, dibujo*); RÜDIGER WEHNER (*fotografía*)

Mejora genética de cereales

La comparación de los genomas de los principales cultivos de cereales, junto con la mejora asistida por marcadores moleculares, abren el camino hacia una nueva revolución verde

Stephen A. Goff y John M. Salmeron

Durante milenios, los agricultores se han dedicado a trabajar sus tierras y mirar al cielo a la espera de un tiempo que favoreciera la cosecha. Cuando encontraban plantas que crecían sin problemas incluso en entornos adversos, resultaban especialmente prolíficas o resistentes a las enfermedades que arrasaban las cosechas vecinas, trataban de capturar sus preciados atributos mediante cruzamientos que daban lugar a nuevas plantas. Se trataba de un proceso simple, a cara o cruz. Carentes de los conocimientos y técnicas que se requieren para examinar el genoma de las plantas e identificar el origen de tales rasgos, debían conformarse con mezclar, emparejar y esperar fortuna.

A pesar de su aleatoriedad intrínseca, el método consiguió resultados notables. El desarrollo de la agricultura, que empezó hace unos 10.000 años, cuando nuestros antepasados cazadores-recolectores se asentaron, propició una explosión demográfica. En la actualidad, la población humana continúa creciendo y demanda un incremento continuo de la producción agraria.

Con todo, el 99 por ciento de la producción depende sólo de 24 especies vegetales domesticadas. De ellas, el arroz, el trigo y el maíz representan la mayor parte de la ingesta calórica mundial. Cada uno de esos tres destacados cereales se produce hoy en cantidades que exceden los quinientos millones de toneladas anuales. Para seguir alimentando a todos los habitantes del planeta, que en 2050 se calcula que alcanzarán los nueve mil millones, y suponiendo el consumo medio actual de entre 0,4 y 1,5 kg de cereales por persona y día, la producción de estas gramíneas deberá mantener un crecimiento anual del 1,5 por ciento; y ello, en una superficie cultivable cada vez más reducida.

Los expertos estiman que la productividad de los cereales todavía no ha alcanzado su máximo. Existe, pues, un gran interés en hacer realidad ese incremento potencial y superar así los límites de la producción actual. El conocimiento más pleno de los genomas de los tres cultivos principales revela que algunas de las claves que permitirán avanzar en este camino pueden hallarse en las especies que los originaron.

Origen de los cultivos modernos

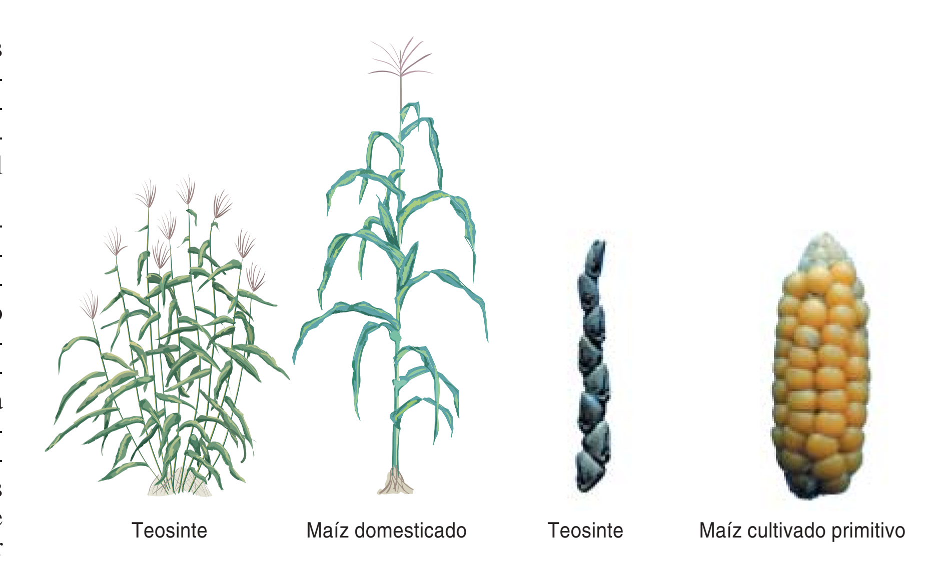
Según estudios moleculares y genéticos, el trigo, el arroz y el maíz, así como la cebada, el mijo, el sorgo y otras gramíneas, están más emparentados de lo que se creía. Ello significa que el avance en una de estas especies habrá de ayudar a comprender y, por tanto, mejorar las otras. Constituye también una fuente de posibles mejoras el acervo génico de los antepasados silvestres de nuestros cultivos, pues sus caracteres de interés agronómico pueden trasladarse, por hibridación, a las variedades modernas.

Aunque los cereales cultivados descienden de una planta ancestral común, divergieron entre sí hace entre 50 y 70 millones de años, colonizando regiones específicas. Se admite que fueron los agricultores del Creciente Fértil mediterráneo los primeros en domesticar, hace unos 10.000 años, el trigo. En el territorio

1. PLANTULAS DE ARROZ. Su ADN se analiza en busca de los genes responsables de los caracteres de interés agronómico.



KAY CHERNUSH



2. EL MAIZ MODERNO Y EL TEOSINTE, su antepasado, discrepan tanto en su morfología (*ilustraciones*), que su parentesco se cuestionó hasta que las pruebas genéticas lo confirmaron. Mediante la multiplicación selectiva de las variedades portadoras de las características deseadas, los campesinos de la antigüedad que habitaban en el actual México favorecieron, sin saberlo, alelos que controlan el patrón de ramificación, la estructura del grano y otros atributos de la planta. Hace unos 4400 años, la dura vaina del teosinte (*fotografía de la izquierda*) desapareció. Las mazorcas de maíz de aspecto carnoso (*fotografía de la derecha*) contaban ya con los alelos que hoy controlan el depósito de proteína y la calidad del almidón en todas las variedades cultivadas.

que hoy corresponde a México, los campesinos habrían empezado a cultivar, un milenio más tarde, un antepasado del maíz moderno. Los chinos, por su parte, domesticaron el arroz hace más de 8000 años.

A medida que nuestros antepasados domesticaban esas plantas, fueron creando los cultivos que conocemos en la actualidad. Su método era muy similar a la mejora vegetal moderna. A partir de las variedades silvestres, propagaron de forma selectiva y cruzaron entre sí individuos con un mayor tamaño de granos, con espigas mayores o con otros rasgos deseables. Las plantas que no dispersaban sus semillas, por ejemplo, también revestían interés, pues, si bien requerían la intervención humana para propagarse, recoger su grano resultaba más fácil. Los primeros agricultores también seleccionaban las plantas por sus cualidades nutritivas; pensemos en los granos con un epicarpio fino que permitía su consumo o las variedades de maíz cuyo almidón ofrecía suficiente consistencia para hacer tortillas. De esta forma, las plantas cultivadas se fueron diferenciando de sus progenitoras. Terminaron por dejar de cruzarse con sus versiones silvestres. El maíz llegó a divergir tanto de su antepasado, el teosinte, que el parentesco entre estas dos especies se puso en tela de juicio hasta fecha reciente.

Esta modificación de los cereales mediante propagación selectiva y reproducción cruzada, iniciada en la prehistoria, no se detuvo. A lo largo de los últimos cien años, se ha venido seleccionando las plantas con el fin de aumentar el tamaño de las espigas, portadoras de semillas, y así incrementar la producción. Pero el viento dobla fácilmente el tallo de plantas con espigas poderosas. Hubo, pues, que cruzarlas con razas de tallo corto y así evitar el encamado. Se logró aumentar la resistencia a enfermedades, la tolerancia al estrés ambiental y una utilización más eficaz de los abonos nitrogenados; con ello, se multiplicó el rendimiento y la calidad. Fue ésta la revolución verde de los años sesenta del siglo pasado. Por citar un ejemplo paradigmático, desde 1950 la producción media de maíz en los EE.UU. ha aumentado en torno al 400 por ciento.

Pero incluso durante este período de auge, el método que utilizaban los expertos en mejora vegetal difería poco del de los primeros agricultores. En su mayoría, limitaban su atención al tamaño del grano, la arquitectura de la planta u otros rasgos visibles, con objeto de seleccionar las líneas que después propagarían.

Pese a su técnica rudimentaria, los agricultores prehistóricos fueron los responsables, sin saberlo, de una selección génica. Así lo indican los estudios de los genomas de los cereales cultivados. El grupo dirigido por Svante Pääbo, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva en Leipzig, examinó los alelos (o versiones) de algunos genes en mazorcas de maíz halladas en México, en enclaves próximos al origen de la domesticación de esta planta. A tenor de los resultados, hace unos 4400 años el maíz domesticado ya contaba con alelos que controlaban el patrón de ramificación de la planta, así como la calidad de las proteínas y del almidón; genes éstos que hoy se encuentran en todas las variedades de esta gramínea. En cambio, en el pariente silvestre del maíz, el teosinte, estos alelos están presentes en sólo del 7 al 36 por ciento de las plantas. Ello indica que la

Resumen/El acervo génico de los cereales

- La comparación de los genomas de los principales cultivos de cereales muestra el estrecho parentesco entre estas plantas. Tan limitada diversidad genética deriva de la domesticación que llevaron a cabo los campesinos de la prehistoria.
- Los alelos responsables de caracteres de interés agronómico se buscan en cultivos modernos, así como en sus parientes silvestres, mediante la identificación de las funciones de los mismos.
- El gen identificado opera entonces como marcador molecular. Merced a esta técnica, los cruzamientos tradicionales podrían acelerarse y ganar en precisión.

NINA FINKEL (*dibujos*); JOHN DOEBLEY (*fotografías*)

presión de selección que ejercieron los primeros agricultores fue rápida y de gran alcance.

De hecho, pese a trabajar de forma independiente con diferentes especies de cultivos, los actuales programas de mejora vegetal han estado seleccionando (también sin advertirlo) mutaciones en genes similares. La cartografía génica —que acota la localización probable del gen responsable de un determinado carácter en una región cromosómica, o locus— ha mostrado que muchas de las alteraciones que los humanos han provocado en los cereales modernos se hallan en loci similares en los genomas de plantas cultivadas emparentadas. Tal coincidencia se explica por las estructuras de los genomas de estos cereales, que, a pesar de los millones de años de evolución independiente, evidencian una estrecha semejanza.

Cosecha de genomas

Pertenecientes a diversos cereales domésticos se han cartografiado ya varios miles de loci responsables de caracteres de interés agronómico. Ponen de manifiesto un notable grado de conservación de la estructura genómica de ese grupo de plantas. Debido a la elevada correspondencia del orden génico, o sintenia, todas estas gramíneas se adscriben a un solo sistema genético; ello significa que cualquier descubrimiento relacionado con los genes o su función en uno de tales cereales facilitará el conocimiento y mejora del resto.

El genoma del arroz (*Oryza sativa*) será el primero en secuenciarse por completo. Podría, pues, constituir la principal fuente de nuevos hallazgos. Uno de los autores (Goff) ha publicado ya un borrador de la secuencia de la subespecie *japonica* del arroz, la más cultivada en Japón y los EE.UU. Investigadores chinos han elaborado un borrador de la subespecie *indica*, la más cultivada en Asia. Se espera, por otra parte, que el Proyecto Internacional de Secuenciación del Genoma del Arroz complete una secuencia detallada de los 12 cromosomas del arroz a finales del presente año.

El genoma del arroz resulta el más fácil de abordar merced a su tamaño, mucho menor que el de los otros cereales: su ADN consta de sólo 430 millones de pares de nucleótidos. El del maíz (igual que el humano), en cambio, cuenta con 3000 millones de pares de bases, el de la cebada con 5000 millones y el del trigo 16.000 millones. Se trabaja ya en la secuenciación del genoma del maíz; y se proyecta acometer la del trigo. En el caso del arroz, ya se han identificado decenas de miles de genes. Sin embargo, saber que un segmento de genoma corresponde a un gen nada nos dice acerca de la función del mismo.

Existen varios métodos para determinar la función de un gen. El más directo consiste en buscar coincidencias en las bases de datos que almacenan las secuencias de todos los genes conocidos. Cuando el gen que se pretende identificar es responsable de alguna actividad celular básica —lo que sucede con frecuencia— se encuentra un gen casi idéntico, u homólogo, en microorganismos o en organismos ya estudiados. Ello ocurre, por ejemplo, en 20.000 de los 30.000 a 50.000 genes del arroz; el conocimiento de la función que dichos genes cumplen en otros organismos nos faculta para predecir su misión en el arroz.

Se estima que más de mil genes intervienen en la defensa del arroz contra patógenos y plagas. Cientos de genes se han asignado a rutas metabólicas que conducen a la síntesis de vitaminas, carbohidratos, lípidos, proteínas u otros nutrientes. A partir de datos experimentales extraídos de la investigación con *Arabidopsis* y otras plantas, también se han identificado numerosos genes que regulan estas vías biosintéticas o que se hallan implicados en la floración y embriogénesis.

Y eso no es todo. Mediante micromatrices, se ha conseguido catalogar los genes que se expresan en distintos tejidos cereales. En nuestra compañía (Syngenta), por ejemplo, tras examinar 21.000 genes del arroz, se han identificado 269 que se expresan durante el desarrollo del grano. Ello sugiere que dichos genes son responsables de la constitución nutricional del grano maduro.

Existe otro método para determinar la función de un gen. Se busca silenciarlo, mediante la inserción de una mutación que interrumpe su actividad, para observar luego qué le ocurre a la planta. Pero el efecto no siempre resulta visible. En ocasiones, la planta modificada debe examinarse en busca de alteracio-

CARACTERES DE INTERES

Los caracteres de interés agronómico se agrupan en cuatro categorías: crecimiento, arquitectura de la planta, tolerancia al estrés y contenido nutricional. El incremento de la cosecha —el objetivo más anhelado en agricultura— puede lograrse mediante el aumento del tamaño o el número de granos que produce cada planta, del número de plantas que pueden crecer en un espacio determinado, o mediante el reforzamiento de la tolerancia del cultivo a condiciones adversas.

Crecimiento	Arquitectura	Tolerancia al estrés	Contenido nutricional
Tamaño o número de granos	Altura	Sequía	Almidón
Tamaño de la espiga o mazorca	Ramificación	Plagas	Proteínas
Velocidad de maduración	Floración	Enfermedades	Lípidos
		Herbicidas	Vitaminas
		Fertilización intensiva	

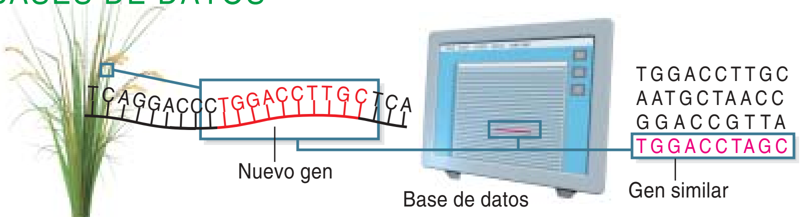


DOUG WILSON *Corbis*

COMO AVERIGUAR LA FUNCION DE UN GEN

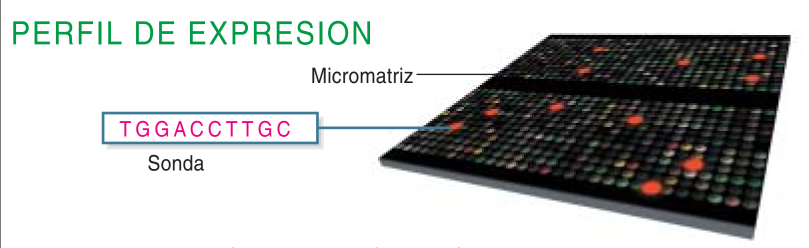
LAS MISMAS TECNICAS que se utilizan para encontrar los genes responsables de enfermedades humanas sirven también para identificar los genes que controlan los caracteres vegetales. La cartografía génica acota la localización probable de un gen en una región cromosómica; la secuenciación del ADN de ese segmento afina aún más la búsqueda. La función del gen se determina luego mediante cualquiera de las siguientes técnicas.

BASES DE DATOS



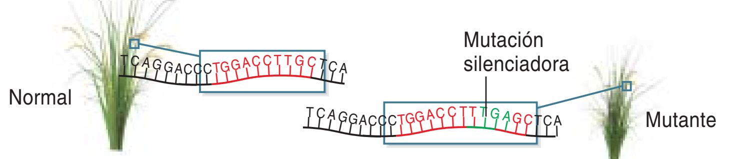
En las bases de datos que almacenan las secuencias de los genes ya conocidos, se busca una secuencia parecida a la del nuevo gen. Se obtiene así un indicio de la función del mismo. En el caso del arroz, de sus 30.000 a 50.000 genes estimados, 20.000 guardan una estrecha semejanza con genes ya estudiados en otros organismos; se les suponen las mismas funciones.

PERFIL DE EXPRESION



Los perfiles de expresión muestran cuándo y dónde se activa un gen en un organismo; información ésta útil para determinar la función del gen. Una micromatriz alberga miles de sondas, o fragmentos, de ADN. Cada sonda se aparea con una signatura de la actividad de un gen, un ARN mensajero (ARNm). Cuando las muestras de tejido vegetal pasan por la micromatriz, cualquier ARNm presente se une a su sonda complementaria, que emite luz. Si un gen se expresa sólo durante el desarrollo del grano, por ejemplo, se da por hecho que interviene en dicho proceso.

BIBLIOTECA DE MUTANTES



Los mutantes revelan la función de un gen, pues permiten observar qué ocurre cuando éste no se expresa. Para silenciar el gen en cuestión, se le inserta un pequeño fragmento de ADN durante el desarrollo de la planta. Se examina luego el pie mutante en busca de alteraciones físicas o químicas (respecto a las plantas normales), que ofrezcan pistas sobre la función del gen.

FUNCIONES DE LOS GENES DEL ARROZ

Mediante las técnicas aquí descritas se han estimado las funciones de una notable fracción de genes del arroz.



SLIM FILMS

nes (más sutiles) en cualquiera de sus funciones normales, sean éstas fisiológicas, del desarrollo, de regulación interna o bioquímicas. La investigación realizada por la industria privada y por instituciones públicas ha creado colecciones de plantas de arroz y maíz mutantes, en las que se han silenciado miles de genes. Merced a estos estudios genómicos funcionales y a las comparaciones de secuencias génicas entre especies, se empieza a perfilar el número y la identidad de los genes del arroz —y, por extensión, del maíz, el trigo, el sorgo y otros cereales—, responsables del desarrollo, fisiología, metabolismo y rendimiento de la planta.

Pero determinar la función de un gen no constituye la última etapa del proceso de mejora. Debe optimizarse. ¿Cómo? Buscando un alelo superior. En el caso de un gen que controla la acumulación de almidón en el grano de maíz, por ejemplo, buscaremos una versión del gen que opere en condiciones de sequía extrema. Aunque tales alelos podrían hallarse en otras variedades modernas de maíz cultivado, las probabilidades de encontrarlos aumentan si buscamos en sus parientes silvestres. La homogeneidad génica entre los cultivos modernos constituye una consecuencia adversa de la forma en que nuestros antepasados las domesticaron. Se estima que la población que originó el maíz moderno se reducía a sólo unas 20 plantas. Mediante la selección de unos pocos individuos, que propagaron y cruzaron entre sí durante milenios, los campesinos de la prehistoria limitaron de una forma sumamente restrictiva la diversidad genética de las especies domésticas.

A partir de experimentos con plantas de tomate y de maíz, Steven Tanksley y Susan R. McCouch, de la Universidad de Cornell, han logrado los primeros éxitos en la búsqueda de alelos silvestres que podrían mejorar las cosechas. Con su trabajo han puesto de manifiesto la diversidad genética de los parientes silvestres, así como la dificultad de detectar su valioso potencial. En un experimento llevado a cabo a mediados de los años noventa, Tanksley cruzó una variedad silvestre de tomate verde pe-

queño de Perú con un moderno tomate rojo pálido en un cultivar. Inesperadamente, observó que un gen del tomate verde enrojecía todavía más al tomate rojo. Según se comprobó, la variedad peruana carecía de ciertos genes necesarios para completar la síntesis del licopeno, el pigmento que confiere su coloración roja al tomate, pero poseía un alelo superior para un gen que desarrolla una función más temprana en dicha síntesis.

La exploración de la diversidad génica que ofrecen los parientes silvestres de nuestros cultivos modernos sólo acaba de empezar. En arroz y tomates, se estima que un 80 por ciento de los alelos de cada especie permanece aún oculto. Estudios de Tanksley, McCouch y otros han demostrado repetidas veces la capacidad de alelos silvestres para modificar el aspecto físico de plantas cultivadas, incluso cuando algunos de los cambios parecen contrarios a los atributos de las plantas silvestres, como en el caso del tomate. Sin embargo, identificar ese potencial oculto y trasladarlo a los cultivos modernos resulta casi imposible, a menos que se utilicen las técnicas que emplean genes o loci cromosómicos como marcadores moleculares.



3. JOHN SALMERON (*izquierda*) Y STEPHEN GOFF en su maizal experimental. En el invernadero, las inflorescencias femeninas (mazorcas) se cubren con pequeñas bolsas de papel encerado para evitar su fertilización por las masculinas (panículas), que se encuentran en el ápice del tallo.

KAY CHERNUSH

Mejora asistida por marcadores

Tras identificar los alelos superiores en plantas silvestres o domésticas, la siguiente tarea consiste en insertarlos en una línea reproductora de un cultivar (variedad de cultivo obtenido mediante hibridación selectiva de especies naturales) que queramos mejorar. Se podría usar ADN bacteriano o algún otro vector para transferir los genes seleccionados, aplicando la misma transformación que se utiliza en la obtención de OMG (organismos modificados genéticamente). Pero se está explorando un método que evitaría el largo y costoso proceso que regula la aprobación de plantas transgénicas: la mejora asistida por marcadores génicos.

Identificados los alelos responsables de caracteres de interés agronómico, o incluso sus loci cromosómicos, se podría diseñar una nueva planta que combinara esos rasgos con las mejores cualidades de un cultivar. La nueva planta se obtendría mediante cruzamientos, con la ayuda de la misma técnica que se utiliza en las pruebas de paternidad o para resolver cuestiones forenses: la huella genética.

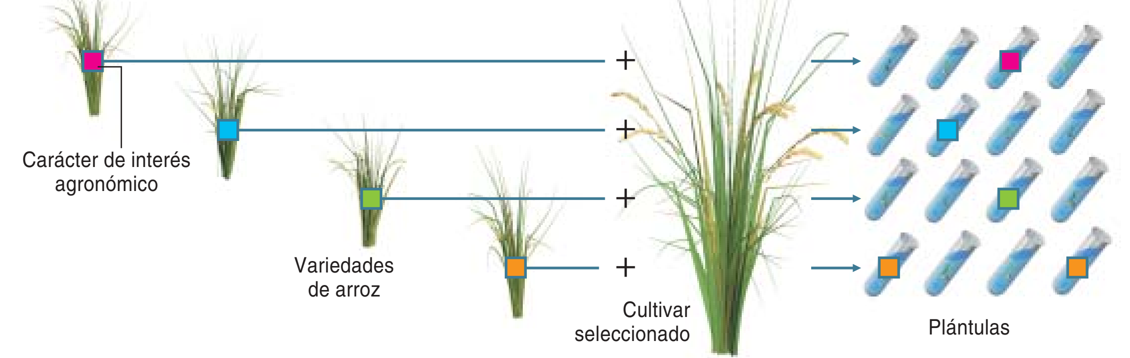
Todo cruzamiento de plantas a larga escala produce decenas de miles de brotes. Sin embargo, en lugar de tener que plantar toda esa progenie y esperar que madure para ver si un rasgo se ha heredado, en la técnica que aquí se propone basta con tomar una muestra de ADN de cada plántula y rastrear el alelo deseado. Dicho alelo constituye entonces un marcador molecular.

Los brotes portadores del alelo en cuestión se cultivarían para luego cruzarlos con el cultivar escogido. En la progenie resultante se buscaría de nuevo el alelo y así sucesivamente hasta obtener una población de plantas parecida al cultivar inicial, pero con un nuevo alelo adquirido. El tiempo que se ahorraría al emplear el método de huella genética para detectar, en cada ciclo, el marcador del rasgo deseado reduciría en años el período que hoy se requiere para desarrollar nuevas variedades de cultivo. Merced a esta agilización del proceso, el sector agrario estaría más preparado para afrontar el ataque de nuevas plagas, la resistencia de las viejas y, en general, para adaptarse a circunstancias cambiantes. Asimismo, la generación de nuevas variedades de cultivo mediante la combinación de rasgos optimizados para sobrevivir en diferentes entornos, permitiría también satisfacer las necesidades de los agricultores o las preferencias de los consumidores.

Pero la importancia de este método reside en su poder para desatascar el cuello de botella génico que se originó hace milenios, cuando se inició la domesticación de los cereales mayoritarios. Conforme se logra un conocimiento más pleno de las funciones de los genes de esas gramíneas, más eficaz resulta la búsqueda en la diversidad génica que albergan sus parientes silvestres. Uno de los experimentos de McCouch sirve de ejemplo. Recurrió a marcadores moleculares para identificar loci de genes en *Oryza rufipogon*, un antepasado silvestre malasio del arroz. Con su equipo de colaboradores, la investigadora aplicó luego la mejora asistida por marcadores para insertar un total de 2000 genes (lo que viene a ser el 5 por ciento del genoma del arroz) en plantas de una variedad moderna de arroz híbrido chino.

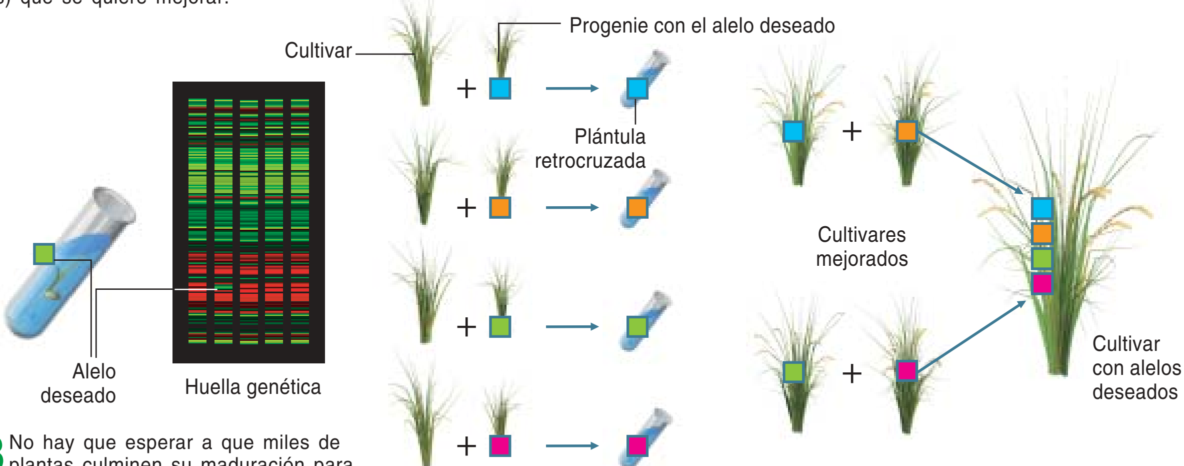
DISEÑO Y OBTENCION DE NUEVOS CULTIVOS

CUANDO SE CONOCE EL GEN que controla un determinado rasgo vegetal —como el tamaño de la semilla—, se busca en diferentes variedades de la planta cultivada, así como en sus parientes silvestres, un alelo superior. Se traslada entonces este alelo de una planta a otra por cruzamiento tradicional, usando el propio alelo como marcador. Para saber si la progenie cuenta con el carácter en cuestión, no hay que esperar una estación de crecimiento entera hasta que madure; en cada tanda de cruzamiento se examinan las plántulas en busca del alelo correspondiente. Este tipo de mejora asistida por marcadores moleculares acortaría de forma notable el tiempo que se requiere para desarrollar una nueva variedad de cultivo.



1 Cada una de estas cuatro variedades de arroz, que presentan caracteres de interés, se cruza con una línea reproductora del cultivar (variedad de cultivo obtenido mediante hibridación selectiva de especies naturales) que se quiere mejorar.

2 Sólo algunas de las decenas de miles de plántulas producidas heredan el alelo deseado.



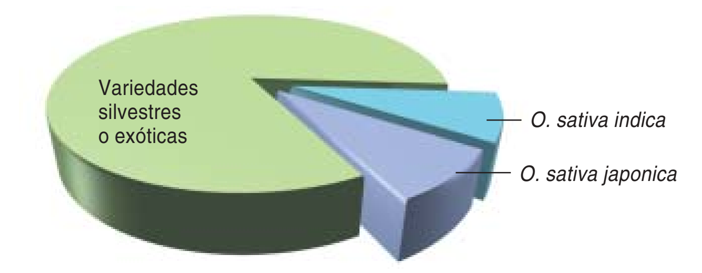
3 No hay que esperar a que miles de plantas culminen su maduración para observar cuáles han heredado el rasgo deseado: la técnica de huella genética permite examinar, a pocos días de la germinación, el ADN de cada plántula en busca del alelo correspondiente.

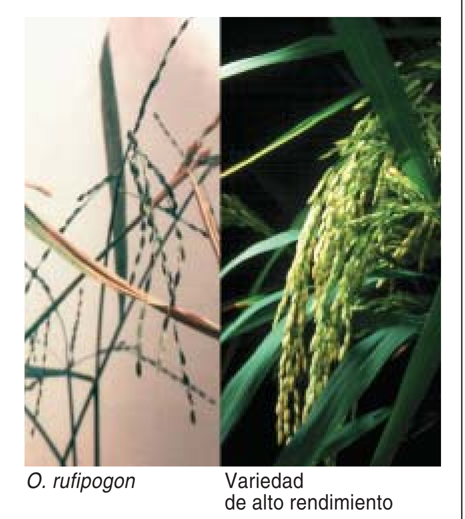
4 Sólo la progenie con el alelo deseado se cultiva hasta que madura lo suficiente para cruzarla con el cultivar. Esta etapa corresponde al retrocruzamiento.

5 Cruzamiento, análisis de la progenie y retrocruzamiento se repiten de forma cíclica, hasta que todos los alelos deseados se han trasladado al cultivar.

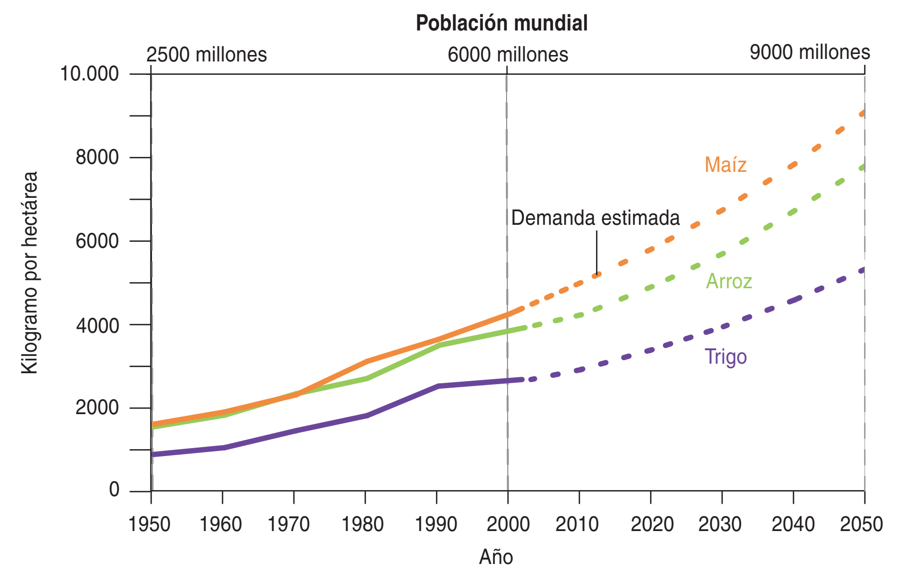
DIVERSIDAD GENICA EN EL ARROZ

Tras milenios de cruzamiento endogámico, los cultivos modernos albergan menos diversidad génica que sus parientes silvestres (*gráfico*). Por eso las plantas silvestres constituyen una valiosa reserva de alelos novedosos. Pero el potencial de tan rico acervo no siempre resulta obvio. En experimentos con el antepasado del arroz *Oryza rufipogon* (*izquierda*), se transfirieron alelos de la planta silvestre a una variedad china de arroz moderno de alto rendimiento (*derecha*) mediante cruzamiento asistido por marcadores. Contra pronóstico, los genes de la planta silvestre de bajo rendimiento aumentaron la producción de la variedad moderna entre un 17 y un 18 por ciento.





O. rufipogon — Variedad de alto rendimiento



4. LA PRODUCCION MUNDIAL de maíz, arroz y trigo se triplicó entre 1950 y 2000; lo mismo ocurrió con la población. Para alimentar a todos lo habitantes del planeta, estimados en nueve mil millones para el 2050, y suponiendo el consumo medio actual de entre 0,4 y 1,5 kg de cereales por persona y día, la producción deberá mantener un crecimiento anual del 1,5 por ciento.

Con este experimento se pretendía encontrar alelos que incrementaran aún más el ya elevado rendimiento del híbrido. De las plantas resultantes interesaba comprobar su altura, la longitud de la parte floral (panícula), el peso del grano y otros rasgos que mejoran el rendimiento. Resultó que alrededor de la mitad de los loci del pariente silvestre contaban con alelos que mejoraban la producción, si bien algunos de ellos alargaban el tiempo de maduración o producían otros efectos negativos para el desarrollo de la planta. No obstante, dos de los alelos de *O. rufipogon* resultaron (aparentemente) inocuos, a la vez que causaron incrementos en la producción del 17 y 18 por ciento, respectivamente, en el cultivar moderno. Igual que en el experimento de Tanksley con el tomate, nada en la apariencia del arroz silvestre sugería que éste pudiera potenciar el rendimiento del moderno; sin embargo, los resultados fueron alentadores.

Por supuesto, no todos los genes beneficiosos pueden trasladarse a los cultivos modernos mediante cruzamiento. Pensemos, por ejemplo, en los que confieren tolerancia a los herbicidas o resistencia a los insectos: no son aptos para el método tradicional simplemente porque no existen en las plantas que pueden hibridarse con el maíz.

Aunque las técnicas de transformación disponibles permiten transferir un gen de una planta a otra, no pueden especificar dónde se inserta el gen en el genoma del organismo receptor. Por tanto, uno podría transferir un nuevo alelo pero no necesariamente tener éxito en reemplazar el viejo, menos deseable. Sin embargo, en las células de ratón y de algunos microorganismos, el proceso de la recombinación homóloga dirige el gen introducido hacia una región cromosómica cuya secuencia nucleotídica guarda con él una estrecha semejanza; de ese modo, el alelo deseable reemplaza directamente el original.

En el futuro, quizá logremos aplicar esta sustitución directa de alelos también en las plantas cultivadas. De hecho, la recombinación homóloga se ha demostrado recientemente en el arroz; un proceso similar se ha empleado para reemplazar alelos en el maíz. Cuando esta técnica se convierta en rutinaria, la capacidad de manipular fragmentos de cromosomas en el laboratorio podría permitirnos intercambiar alelos entre plantas que no se hibridan en la naturaleza.

En la actualidad, la mejora asistida por marcadores está acelerando el proceso en cultivos de una misma especie o parientes cercanos. En los últimos 3000 años, no se ha domesticado ningún otro cereal; por ello, quizá no nos quede, para responder a la creciente demanda de alimento, otra opción que mejorar los cultivos principales. Mediante el desarrollo de técnicas para adentrarse en el genoma de las plantas, conocer sus posibilidades y cosechar sus tesoros ocultos, la ciencia abre el camino a una nueva revolución verde.

Los autores

Stephen A. Goff y **John M. Salmeron**, expertos en genética vegetal, trabajan en la empresa privada. Goff, quien dirigió el primer programa de secuenciación del genoma del arroz, participa en un proyecto humanitario que se propone aplicar dicha información genética a la mejora de las cosechas en los países en vías de desarrollo. Salmeron aisló en el tomate uno de los primeros genes de resistencia de plantas a las enfermedades.

Bibliografía complementaria

SEED BANKS AND MOLECULAR MAPS: UNLOCKING GENETIC POTENTIAL FROM THE WILD. Steven D. Tanksley y Susan R. McCouch en *Science*, vol. 277, págs. 1063-1066; 22 de agosto, 1997.

A DRAFT SEQUENCE OF THE RICE GENOME (*ORYZA SATIVA* L. SSP. *JAPONICA*). Stephen A. Goff et al. en *Science*, vol. 296, págs. 92-100, 5 de abril, 2002.

GRAMENE, A TOOL FOR GRASS GENOMICS. D. H. Ware et al. en *Plant Physiology*, vol. 130, n.º 4, págs. 1606-1613; diciembre 2002.

EARLY ALLELIC SELECTION IN MAIZE AS REVEALED BY ANCIENT DNA. Viviane Jaenicke-Després et al. en *Science*, vol. 302, págs. 1206-1208; 14 de noviembre, 2003.

NINA FINKEL; FUENTE: FOOD AND AGRICULTURE ASSOCIATION

Nanosensores de campos magnéticos

Gracias a unos dispositivos minúsculos que se basan en un fenómeno descubierto hace poco, la magnetorresistencia extraordinaria, podrían construirse discos magnéticos rapidísimos y de enorme capacidad

Stuart A. Solin

En ciencia ocurre a menudo que una investigación dirigida a un determinado fenómeno tiene como resultado el descubrimiento inesperado de otro, hasta entonces desconocido, más apasionante y de una importancia mucho mayor. Esta suerte tuvo en 1995 mi grupo de investigación, entonces en el Instituto de Investigación NEC de Princeton.

Estábamos estudiando las propiedades de una microestructura electrónica, una "superred semiconductora". Se trata de un emparedado de capas de arseniuro de galio y arseniuro de galio-aluminio. Sabíamos que tenía unas propiedades eléctricas muy interesantes. En particular, investigábamos la influencia del grosor de las capas en que la superred se comportase como un metal, de baja resistencia eléctrica, o como un aislante, con mucha resistencia. Colocamos el sistema en un campo magnético; podíamos así estudiar procesos dinámicos en los que participaran los electrones de la superred.

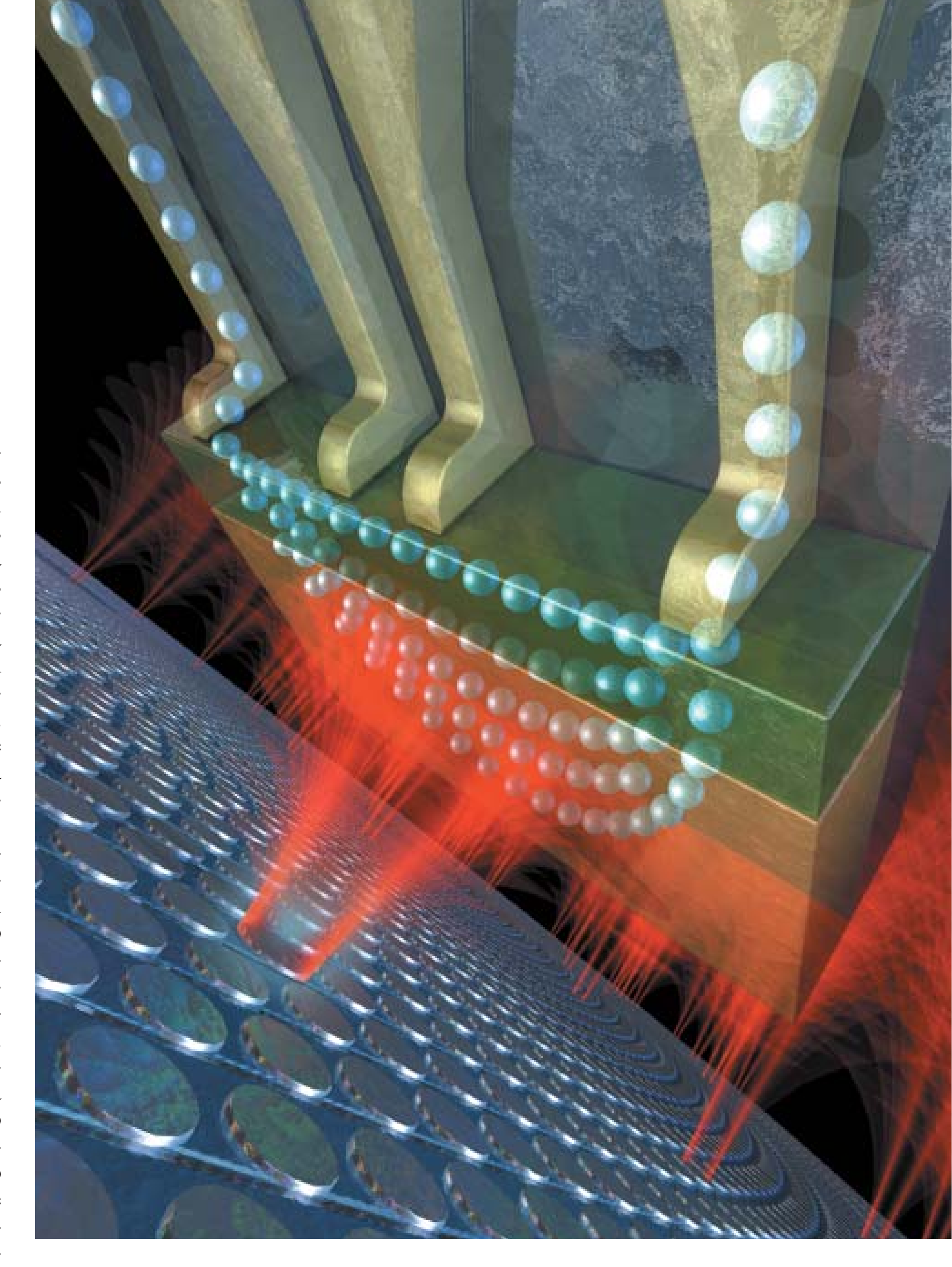
Para nuestra sorpresa mayúscula, comprobamos que la resistencia de la superred aumentaba extraordinariamente cuando incrementábamos el campo magnético. Habríamos esperado que ocurriera así en un material magnético, pero no en nuestra superred, carente de constituyentes magnéticos. La magnetorresistencia (MR), el porcentaje de incremento de la resistencia bajo la acción de un campo magnético, era tan grande y tan inusual, que mi equipo inmediatamente recondujo sus esfuerzos a explicar la física fundamental de este nuevo fenómeno.

Hacia 1997 ya habíamos desarrollado una sólida explicación básica de ese nuevo tipo de abultada magnetorresistencia. Además, predijimos que podrían obtenerse valores considerablemente mayores de MR a partir de una estructura mucho más simple, construida con un material no magnético, el oro (Au), y una única capa semiconductora de antimoniuro de indio (InSb). En 1998, conjuntamente con Jean Heremans, de la Universidad de Ohio, construimos una estructura de InSb-Au que cumplió nuestra predicción (*véase el recuadro* "Verificación del principio"). En un campo magnético de cinco teslas, el aumento de la resistencia eléctrica a temperatura ambiente fue de un millón por ciento, miles de veces mayor que cualquier MR observada antes a esa temperatura. Bautizamos el fenómeno como "magnetorresistencia extraordinaria", o EMR, y adivinamos que podría aplicarse a una gran variedad de procesos técnicos que requirieran sensores muy precisos de campos magnéticos, así la grabación de datos ultradensos y los sistemas de control de la automoción, entre otros usos industriales y diversas aplicaciones a la electrónica de consumo.

Por qué es tan especial la EMR

La EMR no era ni por asomo el primer fenómeno descubierto con una gran MR. En los

LOS DISCOS DUROS DEL FUTURO podrían utilizar cabezales lectores nanoscópicos basados en la magnetorresistencia extraordinaria (EMR) para detectar los campos magnéticos (*rojo*) de los unos y ceros grabados en el disco. El efecto EMR opera cambiando las trayectorias de los electrones (*bolas blancas*) que viajan a través del dispositivo.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

decenios anteriores se habían hallado diversos fenómenos con esas características, en parte gracias al acicate de la demanda de sensores de campo magnético que fueran a la vez pequeños y muy sensibles (*véase el recuadro* "Formas de magnetorresistencia"). No obstante, la EMR es única entre todas las MR grandes porque no requiere materiales magnéticos en su estructura, propiedad científicamente fascinante y al mismo tiempo beneficiosa para algunas aplicaciones, como explicaré más adelante.

Las demás formas de MR elevadas ocurren cuando el campo magnético de los átomos de un material interacciona con el magnetismo intrínseco de los electrones que fluyen a través del material. Para hacerse una idea gráfica de este magnetismo innato de los electrones, cabe imaginar que cada uno contiene un minúsculo imán en forma de barra, con un polo norte y otro sur. Por lo normal, esos imanes apuntan a direcciones arbitrarias y no ejercen ningún efecto en el flujo de la corriente. Sin embargo, en un material magnético los electrones tienden a polarizarse: sus imanes se orientan según el campo magnético del material. Una vez la corriente eléctrica está polarizada, fluye más fácilmente a través de un material que tenga un campo magnético paralelo a su polarización que a través de uno que lo tenga antiparalelo.

Por tanto, las estructuras de MR típicas consisten en una capa de material magnético que polariza la corriente y una segunda capa que posee una imanación controlable; la segunda capa impide o permite el paso de corriente dependiendo de la orientación de su campo magnético con respecto a la primera capa. Los dispositivos que utilizan de esta manera el magnetismo del electrón se llaman magnetoelectrónicos o espintrónicos; esta última denominación indica que el magnetismo está íntimamente ligado a una magnitud cuántica llamada espín [*véase* "Espintrónica", de David D. Awschalom, Michael E. Flatté y Nitin Samarth; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto 2002].

¿Cómo funciona entonces la EMR, en ausencia de un material magnético? La respuesta debe buscarse en una segunda forma de interacción entre el campo magnético y los electrones en movimiento. Cuando una partícula cargada, como el electrón, viaja a través de un campo magnético, el campo ejerce una fuerza transversal a la trayectoria de la partícula que la curva (*véase el recuadro* "Conseguir lo extraordinario"). Este efecto es la causa de la MR ordinaria. El campo curva las trayectorias de los electrones, convirtiéndolas incluso en hélices si el campo es suficientemente intenso. Debido a que los electrones describen entonces trayectorias más largas y sinuosas, su movimiento global de un extremo del material al otro se ralentiza.

De esta manera se reduce la corriente; la resistencia aumenta. Para ser más precisos, los electrones siguen al azar caminos zigzagueantes, debido a las colisiones con

impurezas y otros defectos en el material. No obstante, el campo magnético convierte cada zigzagueo en una curva y aumenta así la longitud del camino total recorrido por los electrones en su tránsito errático por el material.

La enormidad de la EMR también depende de la curvatura de las trayectorias de los electrones por el campo magnético, pero su causa se encuentra en la interacción entre las trayectorias curvas y la geometría del dispositivo EMR a escala nanométrica (a longitudes del orden de las milmillonésimas de metro). La forma, localización y propiedades eléctricas de los elementos del dispositivo —tales como los contactos eléctricos y las regiones de materiales diferentes— pueden contribuir a esta MR basada en la geometría.

En dispositivos magnéticos de MR y en la MR ordinaria en semiconductores no magnéticos, la contribución de la geometría a la MR es insignificante en comparación con la contribución física (la parte que depende de las propiedades intrínsecas del material, como el número de electrones por unidad de volumen disponibles para conducir una corriente). Mediante el diseño de novedosas estructuras híbridas de semiconductores no magnéticos y metales, mi grupo fue capaz de construir dispositivos en los que la contribución geométrica a la MR era muy superior a la contribución física.

El porqué de la EMR

Para entender la EMR, consideremos el dispositivo mostrado en el recuadro "Conseguir lo extraordinario". La parte clave consiste en un disco de oro incrustado en una tableta delgada de un semiconductor de intervalo de banda estrecho, como el InSb (el intervalo de banda de un semiconductor es una banda de estados cuánticos prohibida a sus electrones y cuyo tamaño influye en muchas de las propiedades electrónicas del material). La conductividad del metal es unas 2000 veces mayor que la del semiconductor.

Cuando aplicamos un voltaje por medio de unos contactos eléctricos situados en ambos extremos de la tableta, fluye una corriente a través del dispositivo. Sigue las líneas de campo eléctrico que el voltaje establece en el material. Una propiedad de estas líneas de campo eléctrico es que siempre se alinean perpendicularmente a la superficie exterior de un buen conductor. Este efecto provoca que se curven hacia dentro y se concentren en el disco de metal. De ese modo, la corriente se canaliza a través del metal muy conductor, con el resultado de que el dispositivo tenga globalmente una resistencia baja. El valor exacto de la resistencia dependerá de la geometría; esto es, de las dimensiones relativas y la forma del metal y el semiconductor.

Consideremos a continuación qué pasa si aplicamos un campo magnético perpendicular a la tableta. Igual que en una MR ordinaria, el campo produce una fuerza adicional en las cargas y las desvía como a un avión un viento lateral, de manera que se moverán guardando cierto ángulo con respecto a las líneas de campo eléctrico. Con un campo magnético suficientemente intenso, pueden desviarse hasta 90 grados en la frontera del disco metálico. En otras palabras, la corriente fluirá entonces alrededor del perímetro del disco en lugar de entrar en él (la explicación es algo más complicada, como se describe en la ilustración, pero el resultado final que nos importa es que la corriente evita el disco metálico).

La corriente se comporta exactamente como si se reemplazara el disco metálico con una gran cavidad en el semiconductor que hubiera de ser circunnavegada. Tal estructura —un semiconductor con un disco recortado en él, que estruja la corriente a través de los dos estrechos canales de semiconductor— presenta una resistencia mucho mayor que una tableta ininterrumpida de semiconductor (que tiene por sí misma una resistencia mayor que la de un semiconductor con un disco metálico incrustado en él). Entonces, en ausencia de campo el disco metálico actúa como un cortocircuito (resistencia muy pequeña); en presencia de un campo suficientemente grande es equivalente a un espacio vacío: un circuito abierto, es decir, una gran resistencia. Este cambio de estado produce la EMR.

Para llegar hasta la causa de la EMR ayudó mucho el trabajo pionero de Charles Wolf y Lester Stillman, de la Universidad de Illinois, quienes en 1970 estudiaron estructuras hechas de semiconductor y metal (o "estructuras híbridas").

En particular, investigaron la movilidad de las cargas en las estructuras híbridas, que viene a ser una medida de la facilidad con que los portadores de la corriente eléctrica se mueven en un campo eléctrico. Los portadores pueden ser electrones o huecos (un hueco resulta de la ausencia de un electrón en un mar de electrones, con lo que en muchos respectos se comporta como una partícula cargada positivamente).

Resumen/Una nueva magnetorresistencia

- La magnetorresistencia consiste en que la resistencia eléctrica de un metal o un semiconductor cambie (normalmente aumente) en respuesta a un campo magnético. Una variante de este efecto, miles de veces mayor que ninguna de las previamente observadas, se descubrió en 1998 y se llamó magnetorresistencia extraordinaria (EMR). La EMR depende de la geometría fina de un dispositivo construido a partir de un metal conductor y un semiconductor.
- La EMR puede utilizarse para fabricar cabezales lectores de discos duros que sean más rápidos y capaces de tratar mayores densidad de datos que los cabezales lectores de hoy en día (basados en la llamada magnetorresistencia gigante, o GMR). Debido a que los cabezales EMR no contienen materiales magnéticos, presentarían menor ruido magnético que los cabezales GMR; mejoraría así su rendimiento.
- Muchas otras aplicaciones podrían beneficiarse de la EMR: los robots sensores de la posición, otros sensores industriales de posición y velocidad, los frenos antibloqueo, los amortiguadores "inteligentes", los sistemas temporizadores y de control del encendido, los sensores en interruptores para teclas de teléfonos y las memorias no volátiles de bajo coste para electrodomésticos.

Partiendo del trabajo de Wolf y Stillman, mis colaboradores y yo nos dimos cuenta de que, para campos magnéticos débiles, la EMR había de ser mucho mayor en semiconductores con una alta movilidad de los portadores. Los materiales de intervalo de banda estrecho, como InSb, cumplen el requisito de la alta movilidad. Esta predicción nos animó a desarrollar materiales semiconductores con movilidad aumentada. Lesley Cohen y el ya desaparecido Tony Stradling, del Colegio Imperial de Londres, lograron un importante avance al preparar películas ultradelgadas de InSb con gran movilidad. Michael Santos, de la Universidad de Oklahoma, se ha concentrado con éxito en las heteroestructuras (estructuras que combinan dos tipos de semiconductor) hechas de capas de InSb y de antimoniuro de indio y aluminio (In AlSb). Dirk Grundler y sus colegas de la Universidad de Hamburgo han estudiado a fondo la EMR en estructuras híbridas de arseniuro de indio y metal.

Innumerables aplicaciones

Dos factores han impulsado el descubrimiento y estudio de nuevos fenómenos de MR durante los últimos 16 años: la pura curiosidad intelectual y la promesa de que quepa aplicarlos en sensores magnéticos. Esta promesa se ha convertido ciertamente en realidad en el caso de la MR gigante, o GMR, descubierta en 1988. La mayoría de los discos duros magnéticos de los ordenadores, si no todos, utilizan hoy en día sensores de lectura GMR para detectar los bits magnéticos de la información almacenada.

Los sensores MR en general y los EMR en particular tienen innumerables aplicaciones. Entre las industriales figuran el control de procesos, los robots sensores de posición para líneas de montaje, el control por campo magnético de máquinas y motores, los sensores de velocidad para engranajes y los sensores de posición para componentes ferromagnéticos. En la automoción, se los utiliza en los frenos antibloqueo, los amortiguadores "inteligentes", los sistemas de recuento de vehículos y los de temporización y control del encendido. Los consumidores pueden hallar sensores de

BRYAN CHRISTIE DESIGN

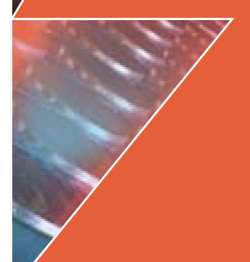
Formas de magnetorresistencia



Si la resistencia eléctrica de un material aumenta o disminuye cuando se le aplica un campo magnético, se llama **magnetorresistencia (MR)** al cambio de resistencia. Este efecto, descubierto en 1857 por el físico británico William Thomson (Lord Kelvin), es insignificante en metales y muy pequeño en semiconductores. En las últimas décadas, se han descubierto varios fenómenos que presentan mucha mayor MR. Las aplicaciones técnicas de algunas de ellas suman miles de millones de euros en ventas.



GMR (Magnetorresistencia gigante): Uno de sus diseños consta de dos capas ferromagnéticas (cobalto o hierro) que forman un emparedado con una capa de metal no magnético en medio. El magnetismo de una de las capas ferromagnéticas se mantiene en una orientación fija, mientras que la otra puede reorientarse mediante un campo magnético exterior. La corriente máxima fluye cuando las dos capas tienen magnetismo paralelo, la mínima cuando es antiparalelo. Los cabezales lectores de los discos duros modernos utilizan la GMR para detectar los campos magnéticos de los bits de información del disco. La descubrieron en 1988 Peter Grünberg, del Instituto de Investigación KFA de Julich, y Albert Fert, de la Universidad de París-Sur.



TMR (MR túnel): Parecida a la GMR, pero en lugar de embutir un metal en el sándwich, utiliza un aislante muy delgado por el que pasa la corriente por efecto túnel cuántico de electrones. La próxima generación de cabezales lectores de disco probablemente se valdrá de la TMR. Tanto la GMR como la TMR son sensibles a cambios muy pequeños del campo magnético. Michel Jullière, del INSA de Rennes, logró medir la TMR, en 1975; el interés hacia ella se reavivó a principios de los años noventa.



CMR (MR colosal): Aparece en unos cristales aislantes de óxido de manganeso, las manganitas. El campo magnético aplicado provoca que el material cambie de no magnético y aislante a ferromagnético y metálico. Es decir, el campo magnético *reduce* la resistencia. La transición ocurre generalmente a temperaturas por debajo de los 150 kelvin y con campos magnéticos de varios teslas. La CMR, descubierta en los años cincuenta por Harry Jonker y J. H. Van Santen, de Philips, en Holanda, y redescubierta en 1994 por Sung-Ho Jin y sus colaboradores, de los Laboratorios Bell, no parece hoy una candidata seria a que se la aplique en los cabezales lectores.



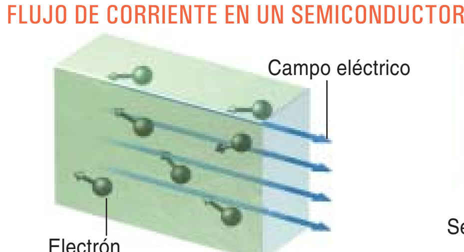
BMR (MR balística): Se observa cuando una aguja y un alambre, ambos metálicos y magnéticos, se unen a través de un contacto nanoscópico. El campo magnético aplicado cambia el magnetismo de los dos componentes de paralelo (baja resistencia) a antiparalelo (alta resistencia). El efecto depende de la trayectoria balística de los electrones a través del nanocontacto (en lugar del transporte difusivo a través de distancias mayores en un metal). La descubrieron en 1999 Nicolás García, Manuel Muñoz y Y.-W. Zhao, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, en Madrid. A finales de 2003 surgieron dudas sobre la validez de ciertos resultados relativos a la BMR; según algunos investigadores, estaban causados por un efecto diferente. El uso de la BMR en cabezales lectores parece una posibilidad remota.

EMR (MR extraordinaria): Como la MR ordinaria y al revés que los demás fenómenos de gran MR, se produce en estructuras que no incluyen materiales magnéticos. Véase el texto principal para más información sobre la EMR.

CONSEGUIR LO EXTRAORDINARIO

La magnetorresistencia surge cuando un campo magnético cambia la configuración de los campos eléctricos en una pieza semiconductora de manera que disminuye el flujo de corriente. La magnetorresistencia "extraordinaria" (EMR) ocurre cuando la geometría de un dispositivo metal-semiconductor interacciona con los campos eléctricos amplificando mucho el efecto.

FLUJO DE CORRIENTE EN UN SEMICONDUCTOR



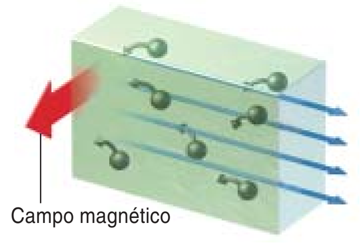
Cuando se aplica un voltaje entre los extremos de una tableta semiconductora, se crea un campo eléctrico que hace que los electrones, que se movían al azar, se desplacen en promedio a lo largo de la tableta.

Corriente eléctrica

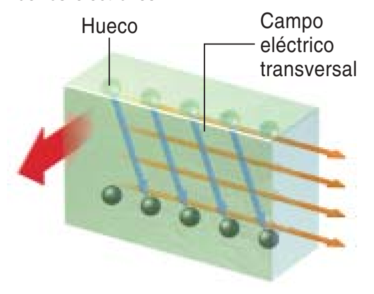
Semiconductor

El conjunto de este movimiento de los electrones constituye una corriente eléctrica que fluye paralela a las líneas de campo eléctrico. Por convención, la dirección del flujo de corriente es opuesta a la del movimiento de los electrones.

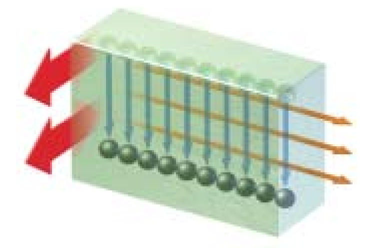
UN VIENTO LATERAL MAGNETICO



Cuando se aplica un campo magnético transversal, se curvan las trayectorias de los electrones. Así crece el camino de los electrones, lo que a su vez reduce la velocidad de desplazamiento a lo largo de la tableta. En consecuencia, se reduce la corriente y produce la magnetorresistencia.

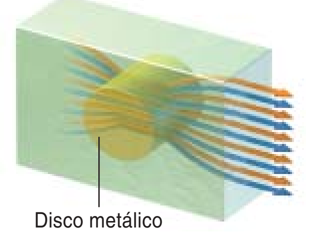


Las trayectorias curvas, además, acumulan electrones en la superficie inferior de la tableta y huecos (ausencia de electrones, con carga positiva) en la superior. Conjuntamente, estas cargas generan un campo eléctrico transversal. La corriente forma un ángulo con el campo eléctrico total, desviado de esa forma por el campo magnético.

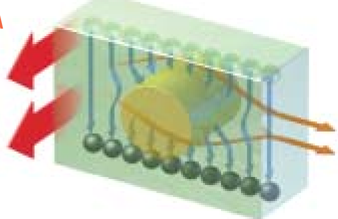


Cuando el campo magnético es suficientemente intenso, el campo eléctrico transversal supera de largo al campo eléctrico original. La corriente entonces fluye perpendicularmente a las líneas del campo eléctrico.

MAGNETORRESISTENCIA EXTRAORDINARIA



Un disco metálico implantado en el semiconductor distorsiona las líneas de campo eléctrico, que son aproximadamente perpendiculares a la superficie exterior de un conductor. Las líneas de campo y el flujo de la corriente se concentran en el disco metálico, de manera que fluye más corriente a través del dispositivo que cuando no hay disco. Es decir, la resistencia del dispositivo es muy baja.



Cuando se aplica un campo magnético intenso, las cargas también se apilan en las caras superior e inferior, el campo eléctrico vertical supera de largo al campo original y el campo eléctrico total se vuelve perpendicular al disco metálico. De nuevo la corriente fluye perpendicularmente a las líneas de campo eléctrico, lo que ahora causa que la corriente rodee el disco. Al quedar estrujada a través de pequeñas tiras de semiconductor, la corriente se reduce drásticamente; la resistencia del dispositivo aumenta enormemente: es la magnetorresistencia extraordinaria.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

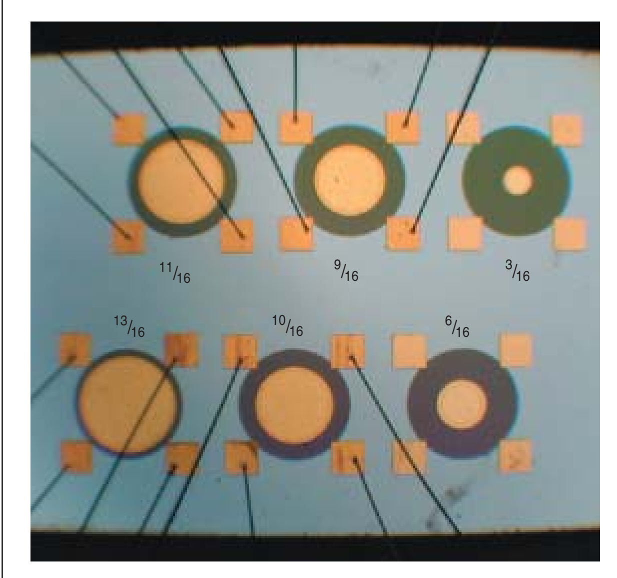
ese estilo en los interruptores de las teclas de los teléfonos, en las brújulas de estado sólido, en las memorias no volátiles de bajo coste de los electrodomésticos, en los conmutadores de los ascensores y en los controladores de motor silenciosos de los discos duros. O también en los artilugios que, mediante la lectura de tintas magnéticas, sirven para clasificar y contar billetes. O como sensores de campos de baja y alta intensidad en medicina.

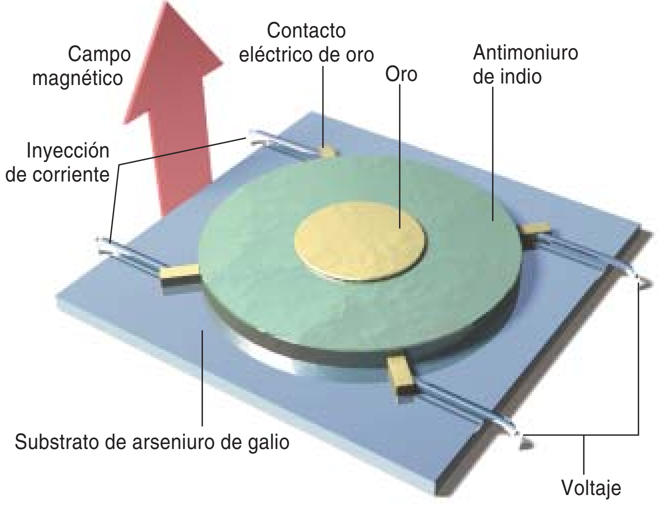
De todas estas aplicaciones, ninguna debe de haber que plantee problemas técnicos más difíciles que las cabezas lectoras de los discos duros. Los discos duros tienen tres componentes clave: el medio magnético del disco, que almacena la información; el cabezal de escritura que graba la información en el disco; y el cabezal de lectura que lee la información. Los tres componentes habrán de mejorar para saciar la demanda actual de memorias de bajo coste, alta velocidad y densidad de datos cada vez mayor.

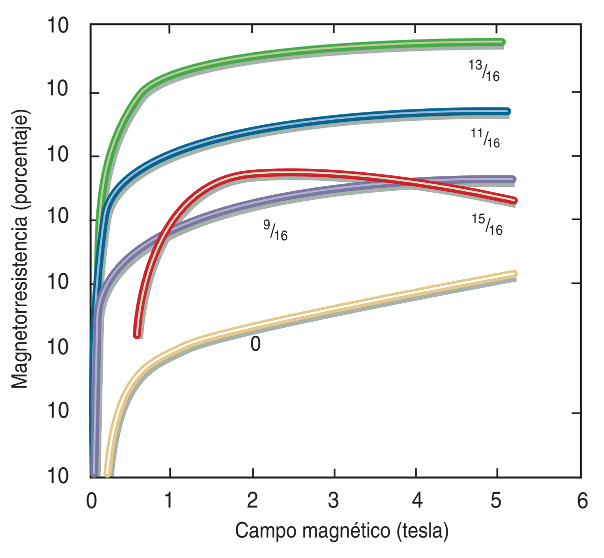
Un bit de información en un disco magnético consiste en una pequeña región imantada que produce un diminuto campo magnético justo encima de ese punto del disco. Para mayor sencillez, aceptemos que un campo que apunta hacia arriba sea un "uno" y que un campo que apunta hacia abajo sea un "cero". Cada pulgada cuadrada (6,45 centímetros cuadrados) de un disco de fabricación reciente contiene alrededor de 20.000 millones de estos bits, es decir, la densidad del disco es de unos 20 gigabits por pulgada cuadrada (Gb/in^2). A medida que se reduce el tamaño del bit para incrementar la densidad de almacenamiento, el cabezal lector debe disminuir y su sensibilidad aumentar para detectar el cada vez más débil campo magnético del bit menguante. El cabezal debe asimismo responder al campo magnético de manera más rápida, ya que un bit más pequeño en el disco en rotación pasa un tiempo menor bajo el cabezal.

En la valoración de un cabezal de lectura, lo que importa realmente no es la simple magnitud de la MR, sino la relación señal-ruido del cabezal, que depende de algunos factores más, aparte del valor de la MR. Una de las más importantes fuen-

VERIFICACION DEL PRINCIPIO







La magnetorresistencia extraordinaria (EMR) se observó por primera vez en unos discos (*fotografía, arriba a la izquierda; esquema, arriba a la derecha*) de Van der Pauw, así llamados en honor de L. J. van der Pauw, de los Laboratorios Philips, quien a finales de los años cincuenta estudió el flujo de corriente a través de semiconductores conformados de distintas maneras en presencia de campos magnéticos. Se incrustaron discos de oro en discos de un milímetro de radio de antimoniuro de indio dopado con telurio. Los discos tenían un grosor de unas 1,5 micras y estaban depositados en un substrato de arseniuro de galio. Los números indican el radio de los discos de oro en fracciones de milímetro. Se midió el voltaje a través de dos de los contactos de oro de cada disco para un valor fijo de la corriente que fluía por los otros dos contactos. A partir de estos datos, se calculó la EMR y se halló que mejoraba si se incrementaba el radio del disco de oro hasta 13/16 de milímetro (*gráfica, derecha*). El experimento se realizó a temperatura ambiente.

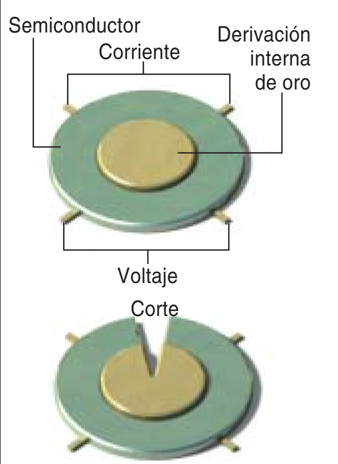
STUART A. SOLIN (*fotografía*); BRYAN CHRISTIE DESIGN (*esquema*); LUCY READING (*gráfica*)

tes de ruido de los sensores de MR que usan materiales imanados —es decir, todos menos los basados en la EMR— es el ruido magnético. En el material el magnetismo está generado por innumerables átomos magnéticos, un ejército de minúsculos imanes que, aunque mantienen una alineación aproximada, fluctúan al azar como agujas de brújula sacudidas. Para grandes volúmenes de material, las fluctuaciones se anulan entre sí y resultan insignificantes en comparación con el magnetismo total.

Al disminuir el volumen del sensor, sin embargo, la proporción de ruido aumenta. El ruido magnético podría fijar un límite fundamental a los cabezales basados en materiales magnéticos en torno a una densidad de datos de unos centenares de Gb/in^2, a pesar de que el objetivo a cinco años vista de la industria de la grabación es de 1000 Gb/in^2, o 1 terabyte por pulgada cuadrada (Tb/in^2). Como los cabezales basados en la EMR usan materiales no magnéticos, no sufren las limitaciones del ruido magnético. Por tanto, representan una posible opción para diseñar un cabezal de 1 Tb/in^2.

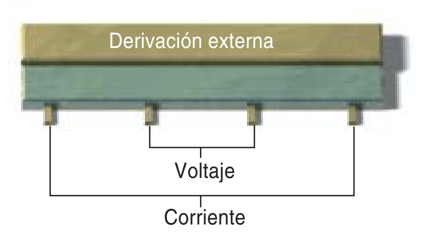
Pero una densidad de 1 Tb/in^2 corresponde a que cada bit ocupe un cuadrado de 25 nanómetros de lado. El cabezal ha de ser de tamaño similar. Fabricar un dispositivo EMR nanoscópico viable presenta un importante desafío tanto científico como técnico. El problema científico estriba en diseñar un dispositivo nanoscópico con suficiente EMR para que resulte práctico: al aventurarse en el régimen nanoscópico, la física de los procesos de conducción eléctrica cambia y la EMR se reduce mucho. Desde el punto de vista técnico, la tarea consiste en diseñar una nanoestructura EMR que pueda fabricarse. Por desgracia, no es fácil reproducir las estructuras de disco en las que se descubrió la EMR a escala nanoscópica. Para afrontar estas dificultades, el equipo del laboratorio NEC de Princeton incorporó a los físicos J. Shen Tsai y Yu. A. Pashkin del NEC de Japón, expertos, respectivamente, en la conducción eléctrica en nanoestructuras y en los métodos de

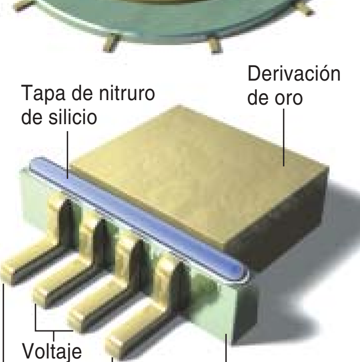
DISPOSITIVOS PRACTICOS



El diseño circular de un dispositivo de EMR (*véase el recuadro anterior*) no es adecuado para su fabricación comercial como componente nanoelectrónico. Mediante una transformación matemática llamada representación conforme, sin embargo, el diseño circular con derivación interna se convierte en un diseño lineal con derivación externa (*debajo*), que sí puede fabricarse con las técnicas nanoelectrónicas existente. Se cortan los discos a lo largo de un radio y se desenrollan. El dispositivo lineal funciona exactamente igual que uno circular, sólo que con todos los elementos y los campos eléctricos y magnéticos transformados por la misma representación conforme (la ilustración está simplificada para mayor claridad: las proporciones del dispositivo lineal no son las mostradas).

Desenrollar







Se construyó un prototipo (*izquierda, abajo*) a partir de un diseño realista de cabezal lector, basado en una derivación externa lineal (*izquierda*). La tapa de nitruro de silicio aísla los contactos de oro de un lado de la derivación de los del otro lado. La densidad de almacenamiento de datos posible con este cabezal lector viene determinada por el grosor de la capa de antimoniuro de indio (InSb) y la separación de los dos contactos de voltaje. El prototipo de cabezal lector podría trabajar con más de 700 gigabit por pulgada cuadrada, unas tres veces más que la densidad estimada para la próxima generación de cabezales por TMR. Las ondulaciones cuasiperiódicas en las paredes laterales de la capa de InSb no se incluyeron deliberadamente, pero resultaron cruciales para el funcionamiento del dispositivo.

BRYAN CHRISTIE DESIGN; STUART A. SOLIN (*micrografía*)

la litografía por haz de electrones con que se las fabrica.

El dispositivo básico EMR que he descrito anteriormente tiene una derivación (*shunt*) interna, el disco metálico situado dentro de un anillo de semiconductor, como una isla rodeada por un foso circular. Mi ampliado equipo del NEC comprendió que esta geometría podía transformarse mediante un proceso matemático, una "representación conforme", en un dispositivo derivado externamente (*véase el recuadro* "Dispositivos prácticos"), donde el semiconductor y el metal forman dos tiras contiguas, con todos los contactos eléctricos —dos para detectar un voltaje y dos para que pase la corriente— alineados en el borde libre del semiconductor. La derivación (una tira de metal conductor) queda ahora en el exterior, al otro lado de los contactos eléctricos. No es fácil describir con palabras la forma que toman las líneas de campo eléctrico o de qué manera las cargas se separan en su movimiento de ellas bajo la acción del campo magnético (evitando de esa manera el metal conductor). Pero la magia de la representación conforme se halla en que garantiza que el dispositivo operará de la misma manera que la versión circular, siempre que la geometría de todos los elementos críticos (semiconductor, metal, líneas de campo y flujos de corriente) se transforme según la representación. La versión lineal con derivación externa tiene la ventaja añadida de la facilidad con que se la puede construir y utilizar, incluso a tamaños nanoscópicos.

Para construir nuestros dispositivos, utilizamos los últimos avances en litografía por haz de electrones; y aviones: las muestras fueron y vinieron de Princeton a Tsukuba cuatro veces durante su fabricación. El resultado final justificó los kilómetros recorridos. Conseguimos unos dispositivos EMR —basados en el tipo de heteroestructuras de Santos— con una densidad efectiva de datos de unos 700 Gb/in^2.

Los aspectos prácticos con que tropieza la incorporación de estos dispositivos prototipo a un cabezal lector real probablemente disminuirán la densidad a la mitad. Hasta la fecha, el diseño de nuestro grupo ha alcanzado una MR de más del 35 por ciento en un campo de 0,05 tesla; basta, creo, para que tenga aplicaciones industriales.

Desconcierto

Mientras nos esforzábamos en averiguar la física fundamental del efecto EMR a escala nanoscópica, caímos en la cuenta de que el dispositivo que habíamos fabricado *no debería haber funcionado*. "Debería" haber tenido una EMR de menos del 1 por ciento. La razón tiene que ver con los caminos zigzagueantes, al azar, que los electrones y los huecos siguen mientras se desplazan en la dirección general del flujo de la corriente (el llamado transporte difusivo). La longitud promedio de cada sección recta (la distancia recorrida entre colisión y colisión con un defecto del material) se llama "camino libre medio". Algunos de los elementos de nuestra estructura nanoscópica son menores que el camino libre medio. En consecuencia, lo más probable es

que una carga alcance la pared de la estructura mucho antes de que encuentre la oportunidad de rebotar contra un defecto. El movimiento de la carga por el dispositivo es, por lo tanto, balístico —lo atraviesa sin zigzaguear—. Se sabe además que un campo magnético desvía a las cargas balísticas confinadas en estructuras nanoscópicas mucho menos que a las cargas difusivas que atraviesan estructuras macroscópicas. Por lo tanto, la menor desviación en la interfase metal-semiconductor de un dispositivo nanoscópico reduce, y mucho, la EMR.

Por fortuna, y no porque se concibiera así, nuestro proceso de fabricación creó unas paredes onduladas de periodicidad aproximada que aumentaban la dispersión de las cargas que incidían en ellas. Esta dispersión transformó el movimiento de las cargas de balístico a difusivo, con lo que se consiguió el gran efecto de EMR asociado al transporte difusivo. ¡La chiripa, que nos llevó al descubrimiento inicial del fenómeno de la EMR, nos ofrecía ahora la fabricación de un prototipo nanoscópico viable! Por suerte, hoy sabemos cómo se forman estas ondulaciones y creemos que podemos controlar su tamaño.

Los cabezales lectores de EMR presentarían otras propiedades interesantes, además de la alta densidad de datos y el bajo nivel de ruido magnético (*véase la tabla* "Rendimientos"). Su velocidad intrínseca de respuesta podría centuplicar con creces la de otros cabezales de lectura. No resultaría difícil integrarlos en sustratos semiconductores y tendrían bajos costos de fabricación. Una desventaja es que hayan de operar a temperaturas bajas, no mucho mayores que la temperatura ambiente. Otra característica es a la vez una ventaja y una desventaja: la respuesta de los cabezales lectores EMR aumenta con la intensidad del campo magnético al cuadrado. Este comportamiento es "no lineal" (lo que es malo), pero mejora la sensibilidad (y eso es bueno).

El inconveniente mayor de los sensores con EMR se encuentra en su propia novedad. Deben superarse importantes barreras técnicas y económicas para que la EMR tenga éxito comercial en la grabación magnética. Tales obstáculos no son raros en el desarrollo de técnicas innovadoras. Y otras técnicas innovadoras podrían dejar anticuada la EMR incluso antes de que se desarrolle, así la grabación magnética ayudada por calor (HAMR), investigada por Seagate, y la grabación no magnética Milpiés, un proyecto de IBM [*véase* "La crisis de las memorias masivas", por Jon William Toigo; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2000; y "Nanounidades de memoria", por Peter Vettiger y Gerd Binnig; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2003]. Pero aun si esto ocurriese, los descubridores de la EMR esperamos ver su utilización en varias de las otras aplicaciones que he citado.

RENDIMIENTOS

Los diferentes tipos de MR ofrecen varias combinaciones de propiedades que pueden ser útiles para aplicaciones comerciales. Aquí presentamos el máximo rendimiento que cabe esperar de las MR en productos reales, comparado con el objetivo a cinco años fijado por la industria de la grabación magnética. Los cabezales lectores de ordenador por EMR, por ejemplo, tendrían mucha mayor densidad de datos y menor ruido magnético que los aparatos actuales basados en la GMR y centuplicarían su velocidad. Los datos que se presentan proceden de informaciones públicas; algunas empresas podrían no haber difundido sus últimos resultados.

TIPO DE EFECTO DE MR UTILIZADO	MR A 300 KELVIN (porcentaje)	DENSIDAD DE DATOS (Gb/In^2)	RELACION SEÑAL-RUIDO (decibelios) (cuantos más, mejor)	CONSTANTE DE TIEMPO (nanosegundos) (cuanto menor, más rápidos)	CAMPO MAGNETICO NECESARIO (teslas) (cuanto menor, mejor)
Objetivo	4-10	100-1000	30-40	0,01-0,1	0,005-0,05
EMR	> 35	> 300	43	< 0,001	0,05
GMR	10	125	29	0,1	0,005
TMR	15	200 estimado	34	0,1	0,001
CMR	0,4	100 estimado	–17	1,0	0,05
BMR	3000	> 1000	10	0,1	0,03

El autor

Stuart A. Solin ocupa la cátedra de física experimental Charles M. Hohenberg del Colegio de Artes y Ciencias de la Universidad de Washington. Durante un tiempo se halló adscrito al Instituto de Investigación NEC de Princeton.

Bibliografía complementaria

SPECIAL ISSUE ON MAGNETOELECTRONICS. *Physics Today,* vol. 48, n.º 4; abril, 1995.

COLOSSAL MAGNETORESISTANCE. Josep Fontcuberta en *Physics World*, vol. 12, n.º 2, páginas 33-38; febrero, 1999.

ENHANCED ROOM-TEMPERATURE GEOMETRIC MAGNETORESISTANCE IN INHOMOGENEOUS NARROW-GAP SEMICONDUCTORS. S. A. Solin, Tineke Thio, D. R. Hines y J. J. Heremans en *Science*, vol. 289, páginas 1530-1532; 1 de septiembre, 2000.

STANDING OUT FROM THE GIANTS AND COLOSSI. Chia-Ling Chien en *Physics World*, vol. 13, n.º 11, páginas 24-25; noviembre, 2000.

LAYERED MAGNETIC STRUCTURES: HISTORY, HIGHLIGHTS, APPLICATIONS. Peter Grünberg en *Physics Today*, vol. 54, n.º 5, páginas 31-37; mayo, 2001.

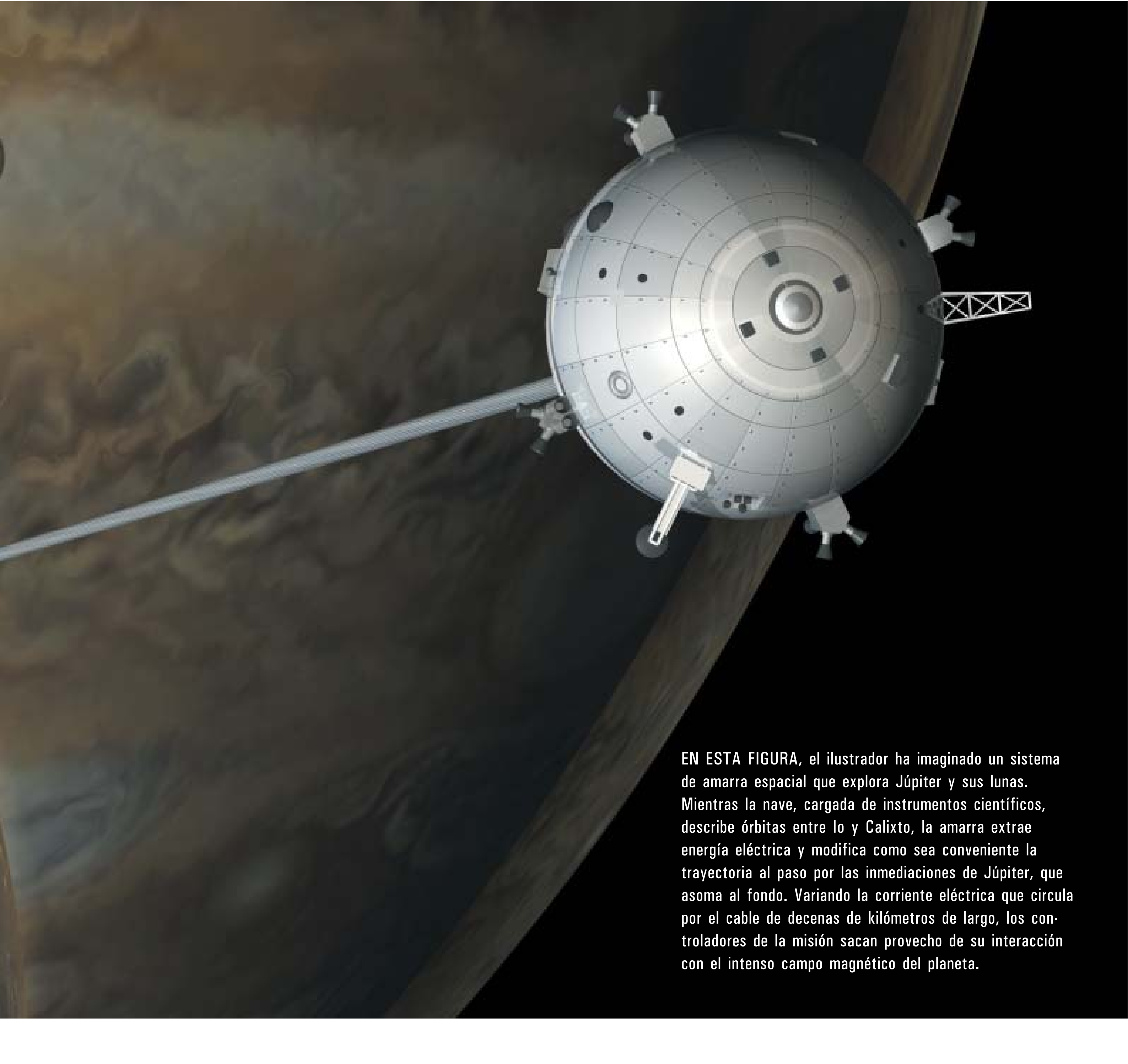
SEMICONDUCTOR FRIDGES GET INTO SHAPE. Stuart A. Solin en *Physics World*, vol. 14, n.º 6, páginas 29-30; junio, 2001.

NONMAGNETIC SEMICONDUCTORS AS READ-HEAD SENSORS FOR ULTRA-HIGH-DENSITY MAGNETIC RECORDING. S. A. Solin, D. R. Hines, A. C. H. Rowe, J. S. Tsai, Yu. A. Pashkin, S. J. Chung, N. Goel y M. B. Santos en *Applied Physics Letters*, vol. 80, n.º 21, páginas 4012-4014; 27 de mayo 27, 2002.



Amarras electrodinámicas en el espacio

Enrico Lorenzini y Juan Sanmartín



EN ESTA FIGURA, el ilustrador ha imaginado un sistema de amarra espacial que explora Júpiter y sus lunas. Mientras la nave, cargada de instrumentos científicos, describe órbitas entre Io y Calixto, la amarra extrae energía eléctrica y modifica como sea conveniente la trayectoria al paso por las inmediaciones de Júpiter, que asoma al fondo. Variando la corriente eléctrica que circula por el cable de decenas de kilómetros de largo, los controladores de la misión sacan provecho de su interacción con el intenso campo magnético del planeta.

Las amarras espaciales sacan partido de leyes físicas fundamentales para producir empuje o frenado, gravedad artificial y potencia eléctrica de bajo coste

ALFRED T. KAMAJIAN

No hay estaciones de servicio en el espacio. Toda nave espacial debe llevar consigo las fuentes de energía necesarias para realizar su misión, por lo usual propulsantes químicos, paneles fotovoltaicos o reactores nucleares.

La otra posibilidad, el servicio de combustible a domicilio, saldría carísima. Por ejemplo, durante una vida estimada de 10 años, la Estación Espacial Internacional necesitará unas 77 toneladas de propulsante de cohete con la sola finalidad de no perder altura gradualmente por la persistente, aunque débil, resistencia de la atmósfera. Incluso tomando un mínimo precio de 15.000 dólares (muy por debajo del actual) por kilogramo de combustible transportado hasta la estación, a 360 kilómetros de altura, el coste total, sólo para mantenerla en la misma órbita, sería de 1150 millones de dólares. Los problemas se agudizan para la exploración de planetas exteriores como Júpiter, donde la luz solar es tan débil que la generación fotovoltaica de energía resulta poco efectiva y donde cada gramo de combustible debe llevarse a cientos de millones de kilómetros de distancia.

Así, ingenieros y científicos vuelven a considerar una técnica ya experimentada en el espacio, la amarra espacial, que explota leyes físicas básicas con el objeto de alterar las órbitas de los satélites o producir gravedad artificial, energía eléctrica y fuerzas de empuje o frenado, al tiempo que reduce o elimina la necesidad de cualquier otra fuente de energía.

En los sistemas de amarra espacial, un cable flexible conecta dos masas en órbita. Si el cable conduce la electricidad, el sistema es una amarra electrodinámica, o EDT en breve. A diferencia de los usuales dispositivos a reacción, en los que hay un empuje mutuo entre la astronave y el combustible de propulsores químicos o eléctricos, en este caso el campo magnético y el plasma ionosférico de un planeta en rotación median para que sean la EDT y el propio planeta los que se empujen entre sí (*véase el recuadro* "Cómo funciona una amarra electrodinámica"). Las amarras han fascinado siempre a los entusiastas del espacio. Visionarios como Konstantin Tsiolkovsky y Arthur C. Clarke imaginaron que valdrían como ascensores espaciales que subiesen personas del suelo a órbita. En los años sesenta, dos de los vuelos Géminis desplegaron amarras de 30 metros para crearles gravedad artificial a los astronautas. Posteriormente se han realizado numerosos experimentos con amarras. Las principales dificultades técnicas son de carácter electromecánico. No se han ideado técnicas fiables para tratar los altos voltajes que experimenta una EDT en la ionosfera del planeta. Tampoco se han resuelto todos los problemas que suscita la propia supervivencia de la amarra en el hostil ambiente espacial, o dominado los medios para amortiguar las varias oscilaciones a que es propensa.

Muchos investigadores, sin embargo, creen que esta técnica puede revolucionar ciertos tipos de vuelo espacial, sean exploraciones planetarias o misiones en órbita terrestre baja (LEO). Las amarras electrodinámicas podrían utilizarse en el espacio próximo para eliminar restos espaciales en órbita, generar electricidad con mayor eficacia que las células de combustible, y situar y mantener satélites en la órbita deseada.

Resumen/Nuevas perspectivas sobre amarras espaciales

- Los sistemas de amarra electrodinámica —dos masas conectadas por un cable conductor largo y flexible— pueden realizar muchas de las mismas funciones que una astronave corriente, pero sin usar combustible químico o nuclear.
- Un sistema de amarra en órbita terrestre baja puede suministrar potencia eléctrica a satélites y naves tripuladas y modificar sus órbitas, así como eliminar de esa región restos espaciales peligrosos.
- En misiones de larga duración, como la exploración de Júpiter y sus lunas, las amarras reducirían drásticamente el combustible necesario para maniobrar; serían al mismo tiempo una fuente fiable de energía eléctrica.

Un sistema en equilibrio estable

Las amarras espaciales explotan aspectos de la dinámica orbital que parecen contradecir nuestra intuición. Sobre cualquier objeto que se halle en órbita circular alrededor de un planeta actúan dos fuerzas opuestas: la fuerza centrífuga, que resulta del propio movimiento orbital y tiende a alejar al objeto del planeta, y la gravitatoria. Las fuerzas gravitatoria y centrífuga se equilibran exactamente en el centro de masas del objeto. Un observador se encuentra a bordo en gravedad cero, o caída libre, y no percibe aceleración alguna.

¿Qué ocurre si en vez de un satélite compacto hay dos satélites en órbitas un poco diferentes, unidos por una amarra? La amarra hace que los satélites actúen como un solo sistema. Gravedad y fuerza centrífuga son iguales a mitad de camino entre ambos, en el centro de masas, pero no en los propios satélites. En el satélite exterior la gravedad será más débil y la fuerza centrífuga más fuerte; la fuerza resultante empujará al satélite hacia fuera. Lo contrario ocurrirá en el satélite interior, empujado hacia el planeta.

El satélite interior, que orbita más deprisa, remolca a su compañero como una lancha a un esquiador acuático. En consecuencia, el satélite exterior gana velocidad a expensas del interior; su órbita se expande así y la del interior se contrae. Al tirar uno del otro, los dos satélites mantienen tenso el cable. Usualmente, las amarras no conductoras son de materiales fuertes y ligeros, como el kevlar (una fibra de carbono) o el spectra (un polietileno de alta resistencia a la rotura). La tensión en el cable es más bien baja, de uno a diez kilogramos-fuerza para sistemas sin rotación.

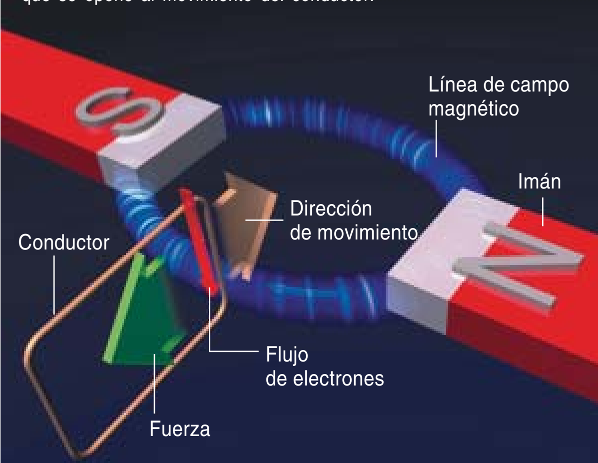
La única posición de equilibrio del sistema corresponde a la amarra alineada según la dirección radial, que es la vertical local. Cada vez que el sistema se desvía de la vertical aparece un par que lo empuja hacia la vertical y lo pone a oscilar como un péndulo. En 1975 se empleó este tipo de estabilización

COMO FUNCIONA UNA AMARRA ELECTRODINAMICA

Los sistemas de amarra electrodinámica tienen la capacidad de realizar muchas de las tareas de una astronave ordinaria sin tener que cargar a bordo combustible.
Las amarras se valen de dos principios básicos del electromagnetismo: cuando un conductor se mueve en presencia de un campo magnético se induce una corriente eléctrica; un campo magnético ejerce fuerza sobre cualquier corriente.

CORRIENTE INDUCIDA

Cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético, sus cargas experimentan una fuerza que las empuja perpendicularmente a su movimiento y a la dirección del propio campo. Una amarra electrodinámica se vale de este fenómeno para generar energía eléctrica. La corriente, a su vez, experimenta una fuerza que se opone al movimiento del conductor.



CORRIENTE FORZADA EXTERNAMENTE

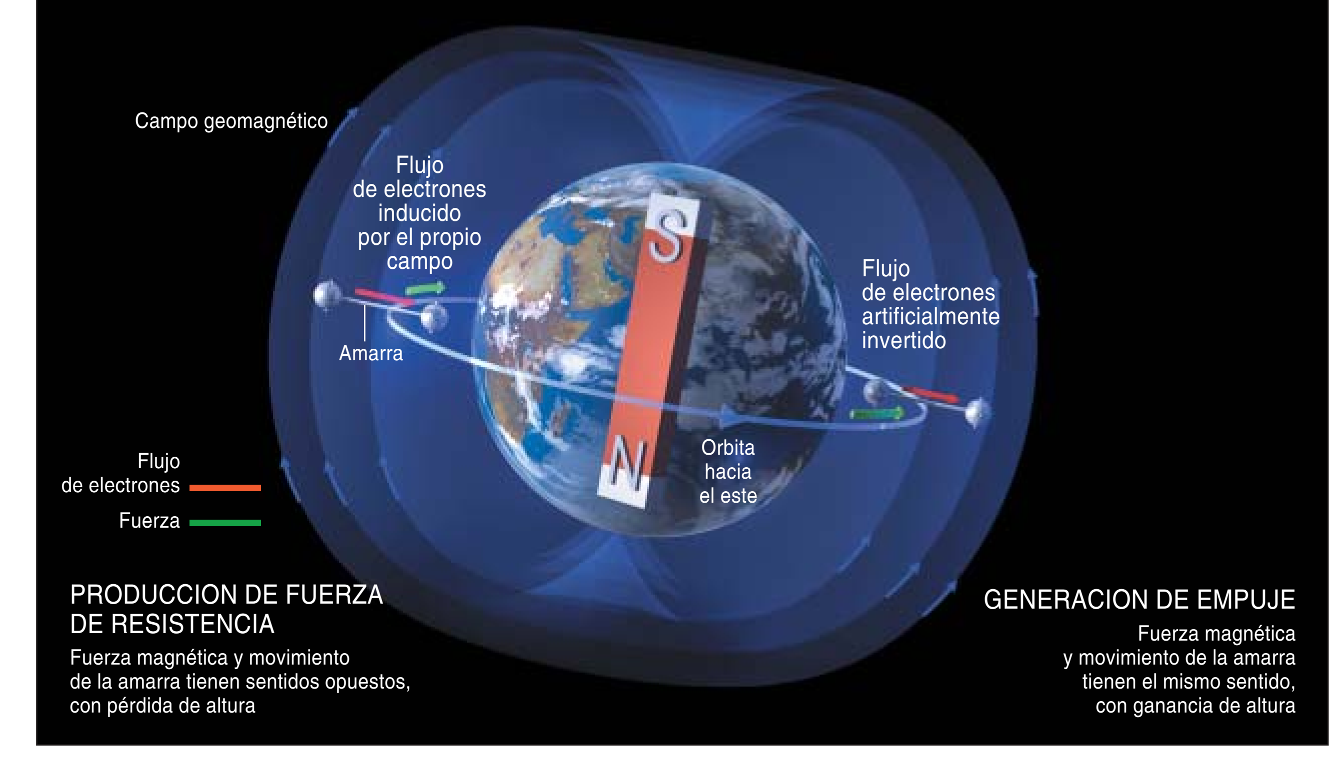
Una batería añadida al circuito podría oponerse a la acción inductora del campo magnético e invertir el sentido de la corriente. La consecuencia sería que la fuerza magnética también cambiaría su sentido. Una amarra electrodinámica en órbita terrestre baja aprovecha este efecto para producir empuje. (Nota técnica: Los diagramas muestran el sentido del flujo de electrones, que es opuesto al sentido convencional de la corriente.)



COMO PUEDE LA CORRIENTE MODIFICAR EL MOVIMIENTO ORBITAL

Cuando una amarra conductora en órbita terrestre baja cruza el campo geomagnético, se induce un flujo de electrones hacia la Tierra (*izquierda*). El propio campo, a su vez, ejerce sobre la corriente una fuerza que se opone al movimiento de la amarra. Esa fuerza de resistencia reduce la energía orbital de la amarra, que pierde altura.

O bien, la fuerza electromotriz de un panel fotovoltaico o de alguna otra fuente de potencia eléctrica puede invertir el sentido de la corriente, y en consecuencia el de la fuerza magnética (*derecha*). Entonces se tiene empuje en el sentido del movimiento de la amarra, que gana energía orbital y altura.



ALFRED T. KAMAJIAN

en el satélite GEOS-3, provisto de una barra rígida de varios metros de longitud, para mantener al satélite orientado hacia la Tierra.

En los análisis de amarras se llama gradiente de gravedad al desequilibrio de fuerzas entre las dos masas. Un pasajero lo describiría como una débil gravedad que tira de él hacia fuera en el satélite exterior y hacia la Tierra en el interior. En órbita terrestre baja (LEO, entre 200 y 2000 kilómetros de altura) una amarra de 50 kilómetros establecería una gravedad de 0,01 g (un uno por ciento de la gravedad en la Tierra). Un astronauta no podría caminar: hace falta un mínimo de 0,1 g para que una persona perciba tracción suficiente. Pero a muchos efectos (uso de instrumentos, duchas, asentado de líquidos), disponer de un "arriba" y un "abajo" bien definidos sería claramente mejor que carecer completamente de peso. Y a diferencia de otras técnicas para crear gravedad artificial, este método no requiere que los satélites giren uno en torno al otro (*véase el recuadro* "Gravedad artificial de una amarra espacial").

Una EDT, con cable de aluminio, cobre u otro material conductor, presenta ventajas adicionales. Por ejemplo, sirve como generador eléctrico: cuando un conductor cruza un campo magnético, sus cargas experimentan una fuerza electrodinámica perpendicular tanto a la dirección del movimiento como al propio campo. De esa forma, si una amarra conductora orbita de oeste a este bajo el campo geomagnético, que apunta al norte, se induce un flujo de electrones amarra abajo.

La amarra intercambia electrones con la ionosfera, una región de la atmósfera en la que, por la acción de la intensa radiación solar, los átomos pierden electrones y forman un plasma, mezcla de electrones y átomos ionizados. La amarra captura electrones por un extremo, el ánodo, que está cargado positivamente, y los expulsa por el otro, el cátodo, cargado negativamente. La ionosfera, muy conductora, permite cerrar el circuito, con el resultado de que se establezca una corriente permanente de la que se puede extraer potencia para uso a bordo. Como ejemplo significativo, una amarra de 20 kilómetros de largo con ánodo eficiente produciría en LEO hasta 40 kilowatt de potencia, suficiente para alimentar los instrumentos de investigación.

Mario Grossi, en el Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, y Giuseppe Colombo, de la Universidad de Padua, fueron los primeros en explorar, en los años setenta, esas capacidades de las EDT. Hasta 16 misiones experimentales se han realizado en el espacio próximo, con cables tanto conductores como dieléctricos (*véase el recuadro* "Misiones de amarra").

En esos primeros sistemas de amarra conductora, una cubierta de teflón aislaba en toda su longitud el cable de la ionosfera y el ánodo era una gran esfera conductora, o un dispositivo equivalente que capturara electrones; tales ánodos, sin embargo, resultan poco eficientes. En los años noventa, por ejemplo, la NASA y la Agencia Espacial Italiana cooperaron para poner en órbita dos versiones del TSS (Satélite de Sistema de Amarra), de 20 kilómetros de cable. El TSS, que capturaba electrones mediante una esfera metálica del tamaño de un balón de playa, exhibió generación electrodinámica de potencia. A pesar de ese positivo resultado, la investigación confirmó una dificultad que ha de superarse para que una EDT pueda tener uso práctico. La carga (negativa) de los electrones en tránsito a un ánodo esférico grande reduce el flujo de nuevos electrones, en cierto modo como el amontonamiento que se produce cuando una multitud se abalanza sobre la salida de un recinto con una sola puerta.

Uno de nosotros (Sanmartín, con sus colegas Manuel Martínez-Sánchez y Eduardo Ahedo) ideó el ánodo de amarra sin aislante (BT) para resolver ese problema. En este sistema, la amarra misma captura electrones a lo largo de kilómetros de su longitud, que se cargan positivamente, en lugar de hacerlo tan sólo en su extremo. El amontonamiento no ocurre en un "punto", sino en una "línea", y la amarra también se beneficia del especial carácter de su delgada geometría cilíndrica. Por otra parte, la amarra puede no ser un cable circular; una cinta de igual superficie recoge la misma corriente pero es mucho más ligera.

Energía casi "gratis" en el espacio

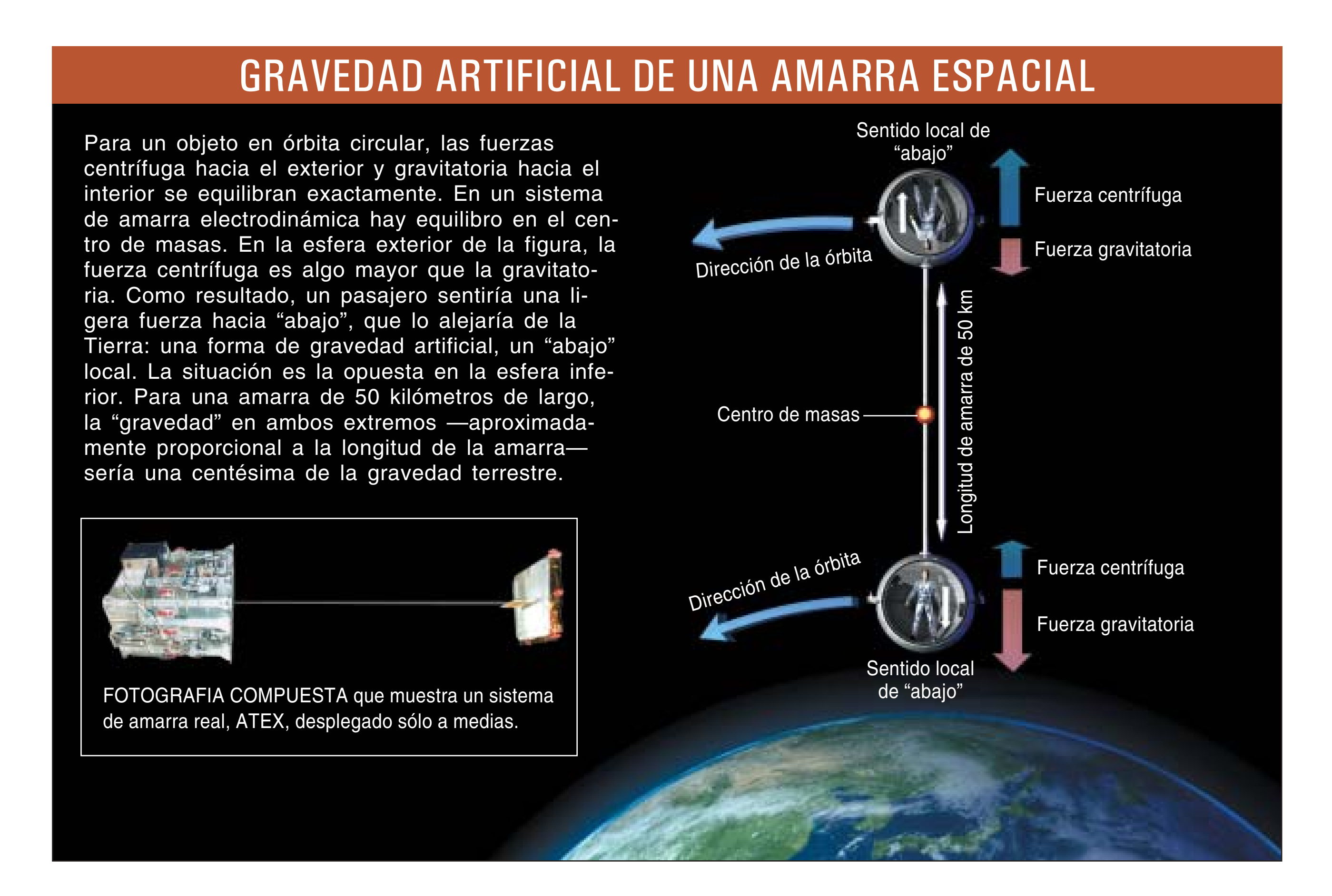
Toda EDT presenta una ventaja: puede aumentar o disminuir la energía orbital del sistema gracias a un principio fundamental del electromagnetismo, a saber, que un campo magnético ejerce fuerza sobre cualquier cable por el que circula corriente, según la familiar "regla de la mano derecha". Para una EDT en órbita terrestre baja, que gire hacia el oeste, con el flujo de electrones de arriba abajo, la fuerza magnética se opondrá al movimiento orbital. La EDT experimentará un frenado semejante al de la resistencia aerodinámica; se reducirá la altura de la órbita.

Eso no parecería un rasgo favorable. Pero es muy atractivo para la planificación de misiones, con la preocupación que hay ante la enorme cantidad de basura espacial que circula en la actualidad en torno a la Tierra, se trate de satélites abandonados o de últimas etapas de cohete. Este problema ha sido una de las motivaciones del desarrollo de amarras por la NASA, universidades y pequeñas empresas. En el presente, la región de las órbitas terrestres bajas está inundada por miles de tales objetos; alrededor de 1500 de ellos tienen masas que exceden los 100 kilogramos. La resistencia aerodinámica los irá retirando de la órbita; irá reduciendo la altura a la que se encuentran, hasta que reentren en la densa baja atmósfera y se quemen. Sin embargo, los objetos que se hallan a una altura de 200 kilómetros reentran en el curso de días, mientras que si orbitan a 400 kilómetros de altura tardan meses en hacerlo y, a una altura de mil kilómetros, reentran sólo a los 2000 años

Si los nuevos satélites llevasen amarras electrodinámicas que actuaran al terminar la misión, o si un robot manipulador capturase los restos espaciales y los llevase a un sistema de amarra en órbita, podría utilizarse el efecto de resistencia magnética para apresurar la reentrada (*véase el recuadro* "Cómo usar amarras para sacar objetos de su

GRAVEDAD ARTIFICIAL DE UNA AMARRA ESPACIAL

Para un objeto en órbita circular, las fuerzas centrífuga hacia el exterior y gravitatoria hacia el interior se equilibran exactamente. En un sistema de amarra electrodinámica hay equilibrio en el centro de masas. En la esfera exterior de la figura, la fuerza centrífuga es algo mayor que la gravitatoria. Como resultado, un pasajero sentiría una ligera fuerza hacia "abajo", que lo alejaría de la Tierra: una forma de gravedad artificial, un "abajo" local. La situación es la opuesta en la esfera inferior. Para una amarra de 50 kilómetros de largo, la "gravedad" en ambos extremos —aproximadamente proporcional a la longitud de la amarra— sería una centésima de la gravedad terrestre.



FOTOGRAFIA COMPUESTA que muestra un sistema de amarra real, ATEX, desplegado sólo a medias.

órbita"). Usando paneles fotovoltaicos u otra forma de fuente de voltaje para invertir el sentido de la corriente en una EDT en LEO, se produce el efecto opuesto. La amarra experimentaría una fuerza de empuje, en la dirección del movimiento, y la órbita subiría. Una EDT de empuje podría servir como remolque espacial para llevar cargas de pago a órbitas más altas, o para compensar el frenado aerodinámico. Recuérdese el alto coste de mantener la Estación Espacial Internacional a la altura deseada. Si la estación contase con una EDT que tomara el 10 por ciento de la potencia disponible, sólo necesitaría 17 toneladas de combustible (en vez de las 77 toneladas previstas ahora) para mantenerse en órbita; más potencia podría eliminar prácticamente la necesidad de combustible. Asimismo, la actuación de una EDT propulsora en un momento apropiado de la órbita producirá fuerzas laterales, útiles para cambiar la inclinación orbital de un satélite, operación que requiere un gran consumo de combustible si se lleva a cabo con un propulsor químico.

Naturalmente, la ley de conservación de energía impide obtenerla realmente "gratis". Por ejemplo, en el caso particular de la extracción de potencia eléctrica para su uso a bordo (en lugar de producir tan sólo empuje o frenado), se obtendría a costa de la pérdida de altura orbital, a la que se llegó inicialmente gracias a la energía química del combustible de un cohete. Podría así parecer que la EDT simplemente intercambia un tipo de energía por otro, en un ejercicio más bien fútil. Con la extracción de potencia el satélite desciende y requiere nuevo empuje de cohete para recuperar la altura. Una célula de combustible, en contraste, transforma directamente energía química en eléctrica. ¿Para qué la complicación de la amarra?

La respuesta es que el sistema de amarra es potencialmente más efectivo, aunque parezca paradójico. La combinación amarra/cohete puede generar más potencia eléctrica que la célula correspondiente de combustible porque la célula no saca partido de la energía orbital de su combustible y la amarra/cohete, que pierde masa de su combustible, sí. En una EDT, la potencia eléctrica resulta del trabajo realizado por el frenado magnético; es el producto de la fuerza de frenado por la velocidad de la amarra (relativa a la ionosfera, que gira con la Tierra), unos 7,5 kilómetros por segundo en LEO. Por su parte, la potencia química generada en el cohete es el semiproducto de su empuje por la velocidad de salida de su chorro. Una mezcla de oxígeno e hidrógeno líquidos puede alcanzar una velocidad de chorro de 5 kilómetros por segundo. En principio, por tanto, la combinación amarra/cohete generaría una potencia hasta tres veces mayor que la producida en la reacción química.

La célula de combustible usa, asimismo, hidrógeno y oxígeno. A igual potencia generada, la combinación amarra/cohete consumiría mucho menos combustible que la célula. La contrapartida es que la amarra es mucho más pesada que la célula. De ahí que utilizar una amarra para generar potencia sólo resultaría en un ahorro global para tiempos de más de alrededor de una semana.

ALFRED T. KAMAJIAN; CORTESIA DEL NAVAL RESEARCH LABORATORY

Amarras incluso en Júpiter

Los sistemas de amarra electrodinámica presentan especiales ventajas para la exploración de los planetas exteriores, en particular en el caso de Júpiter. Aprovechando la peculiar física del planeta gigante, una EDT haría innecesario el consumo de enormes cantidades de combustible. Como la Tierra, Júpiter tiene una ionosfera magnetizada que gira con el planeta. Pero a diferencia de la Tierra, su ionosfera se extiende más allá de la órbita circular estacionaria: un objeto en órbita a esa altura se ve en reposo desde la superficie. Para la Tierra, es de unos 35.800 kilómetros; para Júpiter, 88.500 kilómetros por encima de sus nubes.

Un satélite en órbita estacionaria en Júpiter gira a igual velocidad que el plasma ionosférico de su entorno. Si la nave desciende por debajo de esa altura, donde la velocidad del plasma es menor que su propia velocidad, la corriente eléctrica inducida naturalmente en la EDT producirá una fuerza de frenado al tiempo que generará potencia eléctrica (para su consumo a bordo). Al contrario, más allá de la órbita estacionaria, donde el plasma magnetizado se mueve más aprisa que la nave, se generarán potencia eléctrica útil y fuerza de empuje.

Podría, de nuevo, parecer que se ofrece energía “gratis”. Pero no es así. En ambos casos se toma energía del movimiento de rotación de Júpiter. Por otra parte, la energía de ese movimiento del planeta es tan vasta, que la cantidad tomada por la nave resulta enteramente despreciable.

Según los principios de la dinámica orbital, los puntos de una órbita elíptica donde más efectivos resultarían el empuje o el frenado serían el más cercano y el más alejado de Júpiter, el periapsis y el apoapsis, respectivamente. De modo aproximado, la fuerza magnética apuntará en la dirección del movimiento (empujará) si el punto está por encima de la altura de órbita estacionaria, y será fuerza de frenado en el caso contrario. Supongamos que una astronave con sistema EDT proveniente de la Tierra, con una típica velocidad relativa de seis kilómetros por segundo, se acerca a Júpiter por debajo de la altura estacionaria. En ausencia de fuerza magnética la nave dejaría atrás el planeta. Pero si se permite que fluya corriente inducida en la amarra cuando la nave cruza bajo la órbita estacionaria, podría frenarse el movimiento lo suficiente para que quede en una órbita elíptica alargada, muy excéntrica, en torno a Júpiter. Esa captura orbital requeriría reducir la velocidad tan sólo unos centenares de metros por segundo. Una amarra de decenas de kilómetros de longitud podría conseguirlo.

El control de misión conectaría la corriente de la amarra cada vez que la astronave, en sus vueltas en torno a Júpiter, cruzase por debajo de la altura de órbita estacionaria, cerca del periapsis, para producir frenado (y potencia eléctrica útil), y la desconectaría por encima de esa altura. Eso reduciría gradualmente el tamaño de la elipse que recorre la nave y aproximaría su forma a la circular. La astronave sólo necesitaría entonces modestas fuerzas de amarra para visitar cada una de las cuatro grandes lunas de Júpiter, desde la más lejana (Calixto) a la más próxima (Io). El período orbital de Calixto es de medio mes; toda

COMO USAR AMARRAS PARA SACAR OBJETOS DE SU ORBITA

Decenas de miles de objetos en órbita —satélites abandonados, motores cohete, restos de explosiones y otros residuos— abarrotan la región de órbita terrestre baja, entre los 200 y los 2000 kilómetros de altura. Pasarán decenas de años o siglos hasta que esa basura espacial pierda altura y alcance la atmósfera baja, donde la fricción con el aire la incinerará. Desplegar una amarra en cada satélite futuro apresurará ese proceso de manera simple y con un bajo costo.

ALFRED T. KAMAJIAN

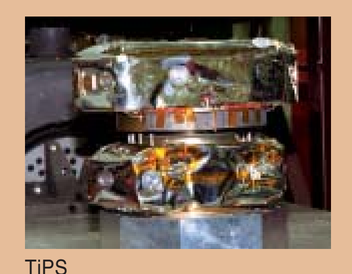
MISIONES DE AMARRA

En las últimas décadas se han lanzado al espacio multitud de amarras con un grado variado de éxito. Ha habido casos en que la amarra no pudo desplegarse en toda su longitud. Pero incluso los más problemáticos confirmaron las capacidades de los sistemas de amarra y dieron lugar a mejoras de diseño. En la tabla se indican en rojo las misiones de amarra electrodinámica.

NOMBRE	FECHA	ORBITA	LONGITUD	AGENCIA
Gemini 11	1967	LEO	30 m	NASA
Gemini 12	1967	LEO	30 m	NASA
H-9M-69	1980	Suborbital	<500 m	NASA
S-520-2	1981	Suborbital	<500 m	NASA
Charge-1	1983	Suborbital	500 m	NASA/ISAS JAPONESA
Charge-2	1984	Suborbital	500 m	NASA/ISAS JAPONESA
Oedipus-A	1989	Suborbital	958 m	NRC CANADIENSE/NASA
Charge-2B	1992	Suborbital	500 m	NASA/ISAS JAPONESA
TSS-1	**1992**	**LEO**	**<500 m**	**NASA/Agencia Espacial Italiana**
SEDS-1	1993	LEO	20 km	NASA
PMG	**1993**	**LEO**	**500 m**	**NASA**
SEDS-2	1994	LEO	20 km	NASA
Oedipus-C	1995	Suborbital	1 km	NRC CANADIENSE/NASA
TSS-1R	**1996**	**LEO**	**19,6 km**	**NASA/Agencia Espacial Italiana**
TiPS	1996	LEO	4 km	NRO/NRL
ATEx	1999	LEO	6 km	NRL



ATEx



TiPS

la secuencia podría llevar menos de un año.

Para regresar, los controladores invertirían el proceso. Se accionaría la EDT en torno al apoapsis, por encima de la altura estacionaria; ahora se producirían empuje y potencia eléctrica. La repetida aplicación de empuje en el apoapsis subiría el periapsis por encima de la órbita estacionaria. En una última fase, se generaría empuje ("gratis" de nuevo) en el periapsis, con lo que aumentaría progresivamente la altura del apoapsis. Un empuje final lanzaría a la nave fuera de órbita y de vuelta a la Tierra. La substracción de energía de rotación de Júpiter suministraría la necesaria para todas esas maniobras, así como la potencia eléctrica de uso a bordo. Con la reducción drástica en necesidades de combustible y potencia, la amarra reduciría mucho el costo de una misión.

La técnica de las amarras espaciales ha madurado extraordinariamente en los últimos 30 años. Habrá de enfrentarse, sin embargo, a varias dificultades antes de que una EDT tenga un uso práctico en órbita en torno a la Tierra, Júpiter o algún otro planeta exterior. Será necesario idear maneras de proteger las amarras de los efectos del alto voltaje entre amarra y ionosfera, así como de la lenta degradación de los materiales en el espacio. Y se han de controlar las varias vibraciones que sufren los sistemas de amarra electrodinámica. Esos obstáculos no son insuperables, sin embargo. Entre científicos e ingenieros, se espera ver amarras en órbita en un no distante futuro.

Los autores

Enrico Lorenzini y Juan Sanmartín llevan una década colaborando en proyectos de amarras espaciales. Lorenzini trabaja en ciencia espacial en el Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, en Cambridge, Massachusetts, donde dirige desde 1995 el grupo de investigación iniciado por los pioneros de las amarras Mario Grossi y Giuseppe Colombo. En 1980 se doctoró en aeronáutica por la Universidad de Pisa. Sanmartín es físico e ingeniero, con doctorados por las universidades de Colorado y Politécnica de Madrid, donde es catedrático de física desde 1974. Con anterioridad trabajó en la Universidad de Princeton y el Instituto Tecnológico de Massachusetts.

Bibliografía complementaria

A SYSTEMS STUDY OF A 100 KW ELECTRODYNAMIC TETHER. M. Martínez Sánchez y D. E. Hastings en *Journal of the Astronautical Sciences*, vol. 35, n.º 1, págs. 75-96; 1987.

TETHERS IN SPACE HANDBOOK. M. L. Cosmo y E. C. Lorenzini. Tercera edición. Smithsonian Astrophysical Observatory, 1997.

OVERVIEW OF FUTURE NASA TETHER APPLICATIONS. L. Johnson, B. Gilchrist, R. D. Estes y E. Lorenzini en *Advances in Space Research*, vol. 24, n.º 4, págs 1055-1063; 1999.

ACTIVE CHARGING CONTROL AND TETHERS. J. R. Sanmartín en *Space Environment: Prevention of Risks Related to Spacecraft Charging*; CNES/ONERA course. Cépaduès Editions, Toulouse, 2002, págs. 515-533.

A 'FREE-LUNCH' TOUR OF THE JOVIAN SYSTEM. J. R. Sanmartín y E. C. Lorenzini en *Proceedings of 8th Spacecraft Charging Technology Conference* (Huntsville, AL, octubre 2003), NASA/CP-2004-213091, junio 2004.

Ecología

El coyote y las áreas tropicales deforestadas

El coyote (*Canis latrans*) es un cánido de hábitos preferentemente nocturnos. De tamaño mediano, su peso oscila entre los 8 y los 18 kilogramos. Su área de distribución se extiende hoy de Alaska al norte de Panamá, un inmenso territorio donde encontramos entornos hábitats muy dispares, desde pastizales y matorrales desérticos hasta bosques templados y tropicales.

Se considera que el coyote constituye un depredador generalista. Aunque se alimenta de micromamíferos y mamíferos de tamaño mediano, aves y reptiles, no rechaza la carroña y consume, de forma regular, frutos y semillas. En Norteamérica, el espacio que cada individuo necesita para vivir fluctúa entre los 4 km^2 en el sur de los EE.UU. hasta más de 60 km^2 en algunas zonas de Canadá. Tamaña oscilación depende, entre otros factores, de la abundancia de presas, el tipo de hábitat y la estacionalidad del ecosistema.

Depredador del ganado y de animales de interés cinegético, arrasa los cultivos. Por eso mismo se ha convertido en un competidor directo del ser humano. Sólo en los EE.UU., se estima que esta alimaña produce pérdidas superiores a los 100 millones de dólares anuales, motivo por el cual se abaten cada año más de 400.000 ejemplares. Pese a ello, y en contra de todo pronóstico, a lo largo de los últimos 100 años han aumentado su área de distribución y el tamaño de sus poblaciones; sobre todo en los EE.UU. y en Canadá. La explicación de semejante paradoja se encuentra en una característica del coyote, que le distingue de muchos otros mamíferos carnívoros: se beneficia de los ambientes alterados por el hombre. Justamente por los perjuicios económicos que causa, nos hallamos ante el carnívoro mejor estudiado en los EE.UU. y Canadá. No puede decirse lo mismo de México y Centroamérica; aquí escasean las investigaciones sobre su ecología, a pesar de ocupar extensas áreas y constituir también una plaga.

Creíase hasta fecha reciente que el límite meridional se situaba, a finales del siglo XV, en el centro de México. De acuerdo con esa tesis, el cambio operado en las actividades productivas tras la llegada de los conquistadores españoles, en particular con la entrada de ganado europeo, habría favorecido la expansión del coyote hacia el sur y sureste de México (con excepción de Yucatán), así como hacia la costa del Pacífico y las tierras altas de Centroamérica. Su límite alcanzaría entonces la actual Costa Rica.

Pero el reciente hallazgo de fósiles pleistocénicos del cánido en Costa Rica, sumado al análisis minucioso de relatos de viajeros y religiosos europeos que mencionan su presencia en el siglo XVI no sólo en territorio costarricense, sino también en Nicaragua y Guatemala, ponen en cuestión la tesis anterior para proponer un nuevo modelo: el límite meridional de la distribución del coyote antes de la llegada de los europeos a suelo americano se encontraba mucho más al sur de lo que se venía afirmando.

En los últimos 25 años, se ha ampliado el área de distribución del coyote en México y Centroamérica. Durante los años ochenta y noventa, se avistaron ejemplares de este carnívoro en zonas hasta entonces exentas de la alimaña; así, el norte de Panamá, el norte de Yucatán y Belice. Aunque carecemos de pruebas concluyentes, se ha sugerido que tal expansión del coyote ha venido inducida por la deforestación de los bosques tropicales, subsecuente al crecimiento de la actividad ganadera, pues los pastizales constituyen el hábitat ideal para el coyote, una especie muy bien adaptada para caminar y cubrir largas distancias.



1. Coyote (*Canis latrans*) en un área tropical.



2. Los coyotes se benefician de la transformación de los bosques tropicales en zonas agrícolas y ganaderas, como este papayal.

En el marco de un proyecto más ambicioso, desde 1998 y bajo la dirección de Carlos López González, de la Universidad de Querétaro, comenzamos un estudio para determinar la importancia que las zonas tropicales deforestadas tienen para los coyotes. Nos concentramos en la reserva de la Biosfera Chamela-Cuixmala y las zonas ganaderas y agrícolas circundantes. En esta región, situada en la costa del Pacífico del estado de Jalisco, la actividad humana ha crecido de una forma intensa en los últimos años. Nuestros primeros resultados mostraban que los coyotes de Chamela-Cuixmala se alimentan de cultivos (mangos y papayas), además de roedores que medran en zonas donde el pastizal ha sustituido al bosque tropical.

Posteriormente, el seguimiento de dieciséis coyotes equipados con un collar transmisor de señales de radio nos permitió observar que los animales seleccionaban áreas agrícolas y ganaderas para satisfacer sus necesidades básicas; utilizaban las áreas de bosque tropical como puentes o corredores para viajar de una zona abierta a otra. De acuerdo con estos datos, la ampliación de las áreas dedicadas a la ganadería y la agricultura en la costa de Jalisco favorecerá, sin duda el crecimiento de las poblaciones locales de coyote. Por tanto, aumentarán las agresiones a los cultivos de papaya y sandía, así como la depredación de aves de corral. En definitiva, incrementarán los conflictos con el hombre. Además, si los coyotes llegan a convertirse en los depredadores dominantes de los sistemas deforestados, las consecuencias ecológicas pueden ser muy importantes; se ha comprobado, en efecto, que las variaciones, positivas o negativas, en el tamaño de las poblaciones de coyotes repercuten de una forma crítica en las comunidades de presas y depredadores medianos.

Si extrapolamos los resultados de nuestro estudio local a una escala regional, llegamos a la siguiente conclusión: en el caso de que se mantengan en México y Centroamérica las tendencias actuales de cambio en el uso de suelo y deforestación, muy probablemente el área de distribución y el tamaño de las poblaciones de coyote aumentarán en las zonas tropicales. Esto podría ser el detonante de nuevos y complejos conflictos entre el hombre y el coyote. Para resolverlos, será necesario desarrollar planes de gestión de la especie.

MIRCEA GABRIEL HIDALGO MIHART
y LISETTE CANTÚ SALAZAR
Depto. de Ecología
y Comportamiento Animal
Instituto de Ecología A. C., Xalapa,
Veracruz, México

Cáncer de pulmón

Factores de riesgo

El número de españoles con cáncer de pulmón (CP), uno de los tumores más estudiados, continúa creciendo. Sin embargo, las incidencias más altas en hombres se hallan en Europa del Este, seguida de Estados Unidos, donde ya es el cáncer más frecuente en mujeres desde 1987.

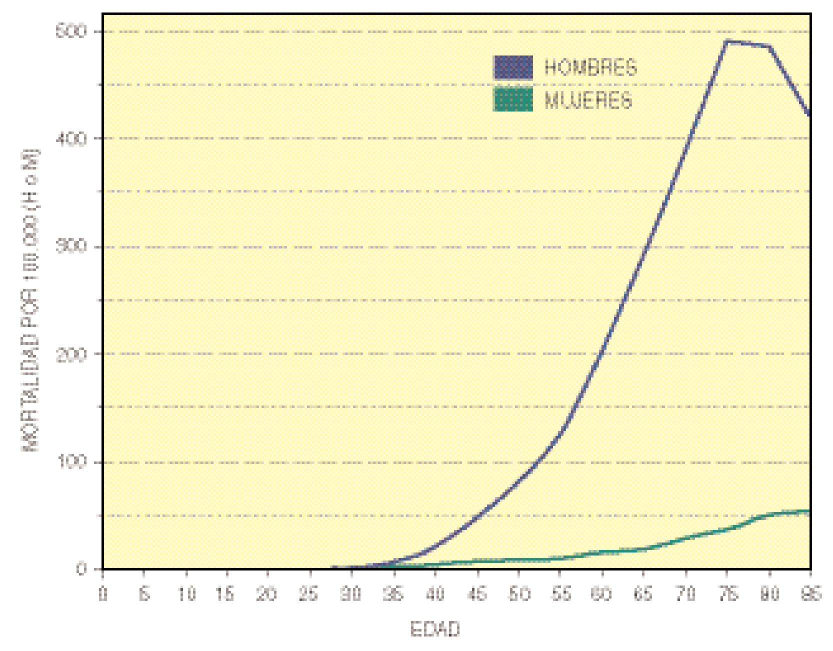
Además de la elevada incidencia, el problema que plantea esta patología reside en su letalidad. En los últimos 30 años, la supervivencia de quienes la sufren apenas ha mejorado: a los cinco años del diagnóstico sólo un 13 % de los casos sobreviven y, globalmente, un escueto 12 %, lo que se deriva de una sintomatología muy inespecífica en sus fases tempranas, fenómeno que condiciona un diagnóstico tardío.

Los factores de riesgo implicados en la aparición del CP son de trascendencia dispar. En clave epidemiológica y preventiva pueden clasificarse en dos grandes grupos: modificables y no modificables; los primeros son prevenibles y los segundos, intrínsecos o propios del individuo.

Factores modificables o prevenibles son:

El tabaco

Principal factor de riesgo del cáncer de pulmón. Se estima que entre el 85 y el 90 % de todas las neoplasias pulmonares se deben a este hábito. De las cerca de 3500 sustancias químicas diferentes que contiene, el humo posee al menos 20 que son carcinógenos pulmonares en humanos o animales; destacan entre tres grupos principales: 1) hidrocarburos aromáticos policíclicos, 2) aminas aromáticas y 3) N-nitro-



1. Mortalidad por cáncer de pulmón en España según el sexo y la edad. (Datos de 1998.) Fuente: Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (IARC).

saminas. Mención especial merecen, por su potente actividad carcinogénica, el benzo(a)pireno en el primer grupo y la 4-metilnitrosamino)-1-(3-piridil)-1-butanona (NNK*)* entre las nitrosaminas.

Duración e intensidad del hábito (tiempo fumando y número de cigarrillos diarios), edad de inicio, tipo de tabaco y grado de consumo del cigarrillo son características del hábito que condicionan el riesgo: a más tiempo y cantidad fumada (sobre todo de tabaco rubio) y a menor edad al inicio, mayor riesgo de padecer CP. El riesgo disminuye a partir del abandono del hábito, y no al pasar al menos 15 años, como se creía. Nunca es tarde para dejarlo: este debe ser el mensaje. Filtros, tabaco "light" u otros mensajes de las compañías sólo contribuyen a fumar más y más profundo.

El tabaquismo pasivo, aunque con menos potencia, se ha revelado como otro factor a evitar que debe tenerse en cuenta en todo programa preventivo. El humo ambiental del tabaco ha sido definido como carcinógeno humano por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

La ocupación

El 23 % de los trabajadores de la Unión Europea están expuestos a carcinógenos en su trabajo. Deben destacarse, entre ellos, la radiación solar, el humo de tabaco ambiental, la sílice y el polvo de madera, siendo los tres últimos conocidos carcinógenos pulmonares. Las ocupaciones en las que se manejan compuestos químicos, o se entra en contacto con polvos o partículas microscópicas (amianto, polvo de madera, sílice) tienen un riesgo relativamente elevado de presentar CP. En ese contexto, hemos de citar a los trabajadores de la construcción, de empresas químicas y de la madera y carpinteros. Además, estarían los mineros, por su exposición al gas radón, y por su riesgo de presentar silicosis, que es otro factor de riesgo del CP.

La ocupación desempeña una función más importante en el desarrollo del CP de lo que se ha reconocido hasta ahora, ya que la jornada laboral de 8 horas supone una larga exposición a sustancias dañinas que, sumado al humo del tabaco o a otras exposiciones de riesgo, como el radón residencial, incrementa el peligro de CP. Tampoco habría que desdeñar el papel de algunas aficiones que suponen exposiciones en el tiempo libre (pinturas, colas, pegamentos, etc.) y que podrían tener un efecto sinérgico con otros factores de riesgo.

La dieta

La dieta constituye un grupo de factores, tanto preventivos como nocivos, en la aparición del cáncer de pulmón. Los elementos protectores son frutas y verduras, por su contenido en vitaminas antioxidantes (A, C y E); el mayor efecto beneficioso se atribuye a los carotenoides, en general, y al beta caroteno, en particular. A pesar de ello, algunos estudios no han encontrado efecto protector para el consumo de suplementos vitamínicos (retinol, beta caroteno o alfatocoferol). Así, algunos organismos públicos han establecido que no hay pruebas suficientes para recomendar los suplementos de vitaminas a fin de prevenir el cáncer y desaconsejan que se las utilice con esa finalidad. Otros diseños epidemiológicos tampoco han encontrado efecto protector contra el CP en el consumo de frutas, si bien la mayoría sí indican sus efectos beneficiosos. Estudios en animales atribuyen cierto efecto protector al aceite de oliva, al igual que en los últimos tiempos se valora el papel del vino tinto en la protección frente a ciertos cánceres y en concreto frente al CP; esa característica le vendría de su contenido en resveratrol.

Las grasas saturadas parecen ser elementos alimentarios de riesgo que propician el CP, aunque el riesgo no es elevado y siempre menor que el efecto protector atribuido a frutas y verduras.

La contaminación ambiental

La contaminación ambiental también se ha asociado con la aparición del CP, básicamente con las principales fuentes de contaminación: escapes de motores de vehículos, sistemas de calefacción, plantas generadoras de energía y otras emisiones industriales. Suelen estar implicadas concentraciones de ozono, dióxido de azufre y partículas en suspensión; el riesgo es mayor en el caso de los fumadores.

El radón (Rn-222), gas que procede del subsuelo en el que se asientan las casas, se exhala a su interior a través de grietas, conductos de agua, electricidad, etc., y las contamina, sobre todo si se ventilan poco. Procede de la desintegración del uranio contenido en rocas del

suelo. Constituye un factor de riesgo de cáncer de pulmón porque emite partículas radiactivas alfa. Se estima que más del 10% de todos los CP pueden atribuírsele directamente. Se conoce la asociación entre el Rn-222 y una mutación del gen *p53*, así como una fuerte interacción conducente al CP entre el tabaco y niveles no demasiado altos de concentración de radón.

En numerosos países se han tomado medidas preventivas para las casas que superan las concentraciones de radón consideradas de riesgo. En España no existe normativa al respecto. Está en fase de elaboración un nuevo Código Técnico de Edificación que parece que contemplará ese problema.

Entre los factores no modificables o intrínsecos figuran:

El sexo
El CP suele diagnosticarse generalmente a edades más tempranas en las mujeres que en los hombres; también la supervivencia es mejor en ellas. Se especula sobre la posibilidad de que los estrógenos femeninos tengan una función en la aparición del cáncer.

La edad
La mayor incidencia del CP ocurre alrededor de los 65 años de edad. Este dato va estrechamente ligado al consumo de tabaco, ya que a esa edad ha transcurrido el tiempo de inducción necesario para desarrollar la enfermedad, puesto que la mayoría de los individuos comienza a fumar antes de los 20 años. La incidencia disminuye a partir de los 80 años, bien por una prevalencia más baja del hábito tabáquico en los grupos de mayor edad, bien a causa de un sesgo o efecto de supervivencia por el que las personas que alcanzan esas edades serían más resistentes genéticamente a ciertos factores de riesgo.

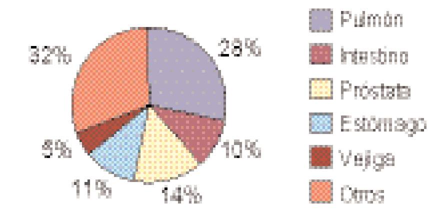
Las enfermedades respiratorias previas
La tuberculosis, la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), la silicosis y la sarcoidosis son enfermedades cuyo padecimiento aumenta el riesgo de CP. Puede que la inflamación del tejido pulmonar favorezca la penetración de carcinógenos. Se ha sugerido el menor aclaramiento —capacidad de eliminación— de los carcinógenos inhalados por estos enfermos como causa del aumento del riesgo.

La raza
Se han observado ligeras diferencias étnicas. Hay mayores tasas de mortalidad entre los afroamericanos y los maoríes neozelandeses.

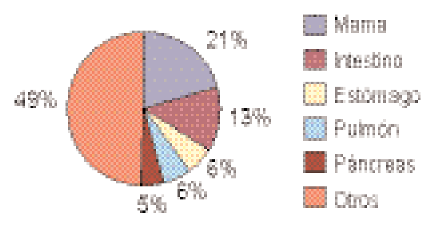
La historia familiar
El riesgo de cáncer de pulmón es mayor en los menores de 59 años con una historia de CP entre los familiares en primer grado. Entre no fumadores y exfumadores de larga duración se observa que el riesgo de CP aumenta directamente con el número de familiares afectados de cáncer. La herencia genética apunta a la hipótesis etiológica de los genes supresores de tumores y protooncogenes, que darían lugar a una mayor frecuencia de fenómenos de disrupción biológica.

La susceptibilidad genética
La razón de que sólo el 15 % de los grandes fumadores (de más de 20 cigarrillos al día) desarrollen CP no es conocida. Quizá se deba a la variedad de polimorfismos genéticos que provocan la acumulación de carcinógenos en el organismo y de los que dependería, pues, la susceptibilidad genética del individuo. Los genes correspondientes, que codifican enzimas responsables del metabolismo de compuestos exógenos, reciben la denominación de genes de baja "penetrancia" —es decir, que la anomalía asociada sólo llega a producirse en determinadas circunstancias—. Actúan como modificadores del efecto de ciertos elementos de la dieta, del tabaco, de la ocupación y de la contaminación ambiental, por separado o conjuntamente.

Todos poseemos dos grandes grupos de enzimas, de fase I y de fase II, codificados por múltiples genes. A la fase I corresponden los genes de la superfamilia del citocromo P450; a la fase II, los genes de la familia de las glutatión-S-transferasas, de la familia de las N-acetil transferasas y de las sulfotransferasas. Las enzimas de fase I convierten compuestos exógenos en sustancias reactivas que se unen al ADN, lo que provoca mutaciones. Las enzimas de fase II facilitan la eliminación de estos compuestos al inducir su conjugación y aumentar su hidrosolubilidad para que sean fácilmente excretables. Cada enzima metaboliza una o más sustancias exógenas: las diferencias en la dotación genética de los individuos pueden dar lugar a diferencias en el metabolismo según cuál sea la exposición a los carcinógenos.



2. Porcentaje de mortalidad por cáncer en varones (España, 1998). Fuente: IARC (Agencia Internacional de Investigación en Cáncer).



3. Porcentaje de mortalidad por cáncer en mujeres (España, 1998). Fuente: IARC.

Hasta la fecha, se sabe de algunos genes de fase I y de fase II con cierto grado de participación en la aparición del CP. De fase I, entre otros, *CYP1A1*, *CYP2D6*, *CYP2A6*, *CYP2C9*, *CYP3A4* y *CYP2E1;* de fase II, entre otros también, *GSTM1*, *GSTT1* y *GSTP*. Investigaciones recientes no sólo combinan la determinación de los genes de fase I y de fase II, sino también la etapa intermedia de la detección de la unión de esas sustancias al ADN (los "aductos"). En cualquier caso, para obtener una visión global de la susceptibilidad genética individual al cáncer de pulmón se necesitan estudios más completos.

Juan Miguel Barros Dios
Alberto Ruano Raviña
Depto. Medicina Preventiva
y Salud Pública
Universidad de Santiago de Compostela

Míriam del Valle, Anna Vidal, Andrea Esplugas y Josep M. Gasol

El hielo: reserva de vida durante el invierno



1. La banquisa antártica alberga una de las comunidades biológicas más diversas y productivas de nuestro planeta. Sin embargo, constituye uno de los ecosistemas más desconocidos.

Cuando llega el invierno austral y la temperatura del aire desciende, se forma hielo en la superficie del océano Antártico. Las aguas quedan así aisladas de la atmósfera. Si, además, nieva, la débil luz invernal no alcanza las aguas, que permanecen en la oscuridad. Lo mismo ocurre en un lago alpino.

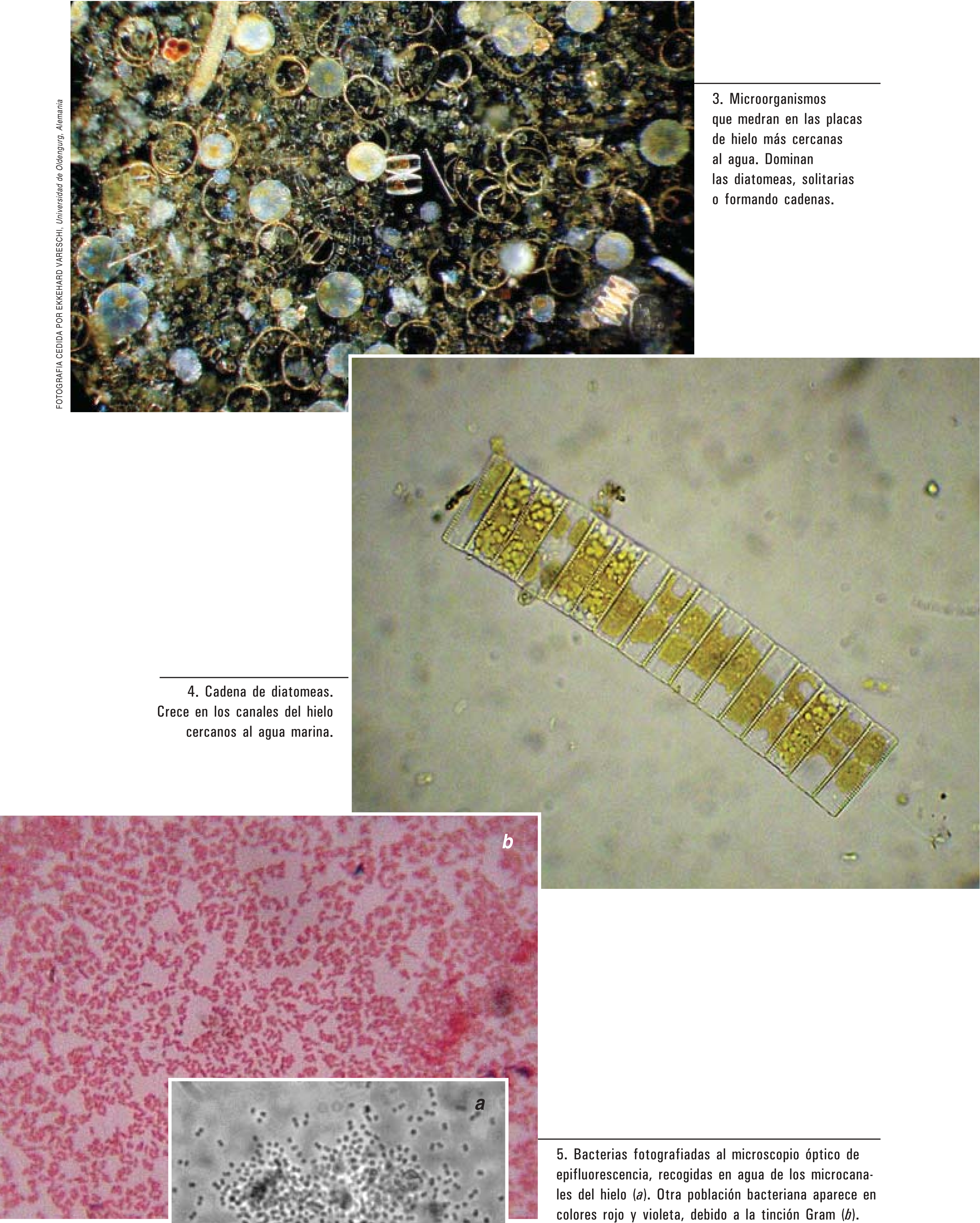
En esos momentos cobra importancia la vida microbiana del hielo. Por un lado, las bacterias que medran sobre el hielo utilizan el carbono orgánico que ha quedado allí atrapado. Numerosas algas unicelulares crecen en las cavidades; se mueven a través de los canales hasta encontrar un poco de luz que les permita llevar a cabo la fotosíntesis. Si la luz escasea, utilizarán el hielo a modo de refugio para hibernar: allí se mantendrán con una actividad mínima, pero sin ser arrastradas por las aguas, hasta que las condiciones ambientales mejoren y les permitan reproducirse.

Al llegar la primavera, y con ésta el deshielo, las algas y bacterias que hayan resistido entre los recovecos del hielo empezarán a crecer, a pesar de que las temperaturas rozan los 0 grados. Crecerán tanto, que se convertirán en la fuente principal de alimento para los crustáceos, especialmente el krill y todos los organismos que se acerquen debajo del hielo. Las algas constituirán la semilla de la proliferación que se desarrolla en las aguas cuando la radiación aumenta y empieza el deshielo.

La capacidad de los microorganismos de crecer y mantenerse en el hielo a muy bajas temperaturas durante el invierno les permite, en la primavera, colonizar rápidamente y con gran eficacia las aguas frías de continentes y océanos.



2. Diatomea céntrica. Se encuentra en la parte superior de la banquisa y dentro de los canales que atraviesan el manto helado.



FOTOGRAFIA CEDIDA POR EKKEHARD VARESCHI, *Universidad de Oldengurg, Alemania*

3. Microorganismos que medran en las placas de hielo más cercanas al agua. Dominan las diatomeas, solitarias o formando cadenas.

4. Cadena de diatomeas. Crece en los canales del hielo cercanos al agua marina.

5. Bacterias fotografiadas al microscopio óptico de epifluorescencia, recogidas en agua de los microcanales del hielo (*a*). Otra población bacteriana aparece en colores rojo y violeta, debido a la tinción Gram (*b*).

Bombas antibúnker nucleares



CORTESIA DE ADMINISTRACION NACIONAL DE SEGURIDAD NUCLEAR, NEVADA

1. FUGA DE GASES RADIACTIVOS debida al ensayo nuclear subterráneo Baneberry, que los estadounidenses acometieron en 1970. Pese a estallar a 275 metros bajo el desierto de Nevada, aquel arma de 10 kilotones liberó lluvia radiactiva a la atmósfera. Esta emisión descontrolada pone de manifiesto las dificultades inherentes a la contención de las detonaciones subterráneas.



Se diseñan bombas nucleares que penetrarán en la tierra para destruir refugios militares. Su utilidad estratégica y táctica se halla en tela de juicio

Michael A. Levi



En el transcurso de la Primera Guerra del Golfo, los potenciales antagonistas del ejército estadounidense aprendieron una ilustrativa lección: la lluvia de bombas inteligentes de alta precisión que cayó sobre centros de mando, depósitos de armas y otras instalaciones del bando iraquí, dejó patente la extrema vulnerabilidad de los activos militares inmovilizados en superficie ante los ataques aéreos. Para quedar indemnes, las bases operativas clave y los depósitos de armas camuflados deberían instalarse bajo tierra, en búnkeres de hormigón fortificados o en el interior de montañas de roca dura.

Tras la operación "Tormenta del Desierto", los estrategas militares empezaron a debatir en torno a la forma más contundente de destruir tales objetivos "reforzados", enterrados a grandes profundidades, teniendo en cuenta que el ataque contra un búnker o un almacén de armamento subterráneos se halla rodeado de incógnitas. No sólo no hay garantía de éxito, sino que, lo que es mucho peor, la operación podría dispersar agentes químicos o biológicos que allí estuvieran ocultos, con efectos letales para las regiones circundantes. Lo que, por supuesto, no era lo previsto.

Se puso sobre la mesa el despliegue de ojivas nucleares de barrena, de bajo rendimiento explosivo. Penetrarían en la tierra antes de estallar, aumentando así su poder destructivo y, según lo esperado, reduciendo la liberación de lluvia radiactiva. En principio, el calor y la radiación generados en la explosión podrían destruir también los agentes químicos y biológicos antes de que éstos escaparan de los búnkeres y pusieran en peligro las poblaciones vecinas. En el transcurso de los años noventa, los partidarios de tales bombas antibúnker nucleares parecieron clamar en el desierto.

Sin embargo, el número de diciembre de 2001 de *U.S. Nuclear Posture Review*, documento de defensa clasificado que se filtró a la prensa meses más tarde, revelaba un interés renovado por esas armas. Tal informe abordaba el desarrollo de nuevas técnicas militares nucleares para ampliar la gama de opciones estratégicas del Pentágono. Bajo los auspicios de la Administración de Seguridad Nuclear Nacional, del Departamento de Energía, en 2003 se invirtieron 6,1 millones de dólares en la investigación de una bomba nuclear robusta de barrena (o RNEP, de "Robust Nuclear Earth Penetrator"); a ese desembolso deben sumarse otros 7,5 millones del último año fiscal. La administración proyecta elevar esas asignaciones e invertir 487,4 millones de dólares entre 2005 y 2009. Al propio tiempo, el Congreso ha aprobado una resolución que financia la exploración de posibles variaciones, más insólitas y controvertidas, sobre el mismo tema. En la opinión de numerosos expertos, tan sustanciosas partidas presupuestarias y tal liberalidad investigadora sugieren que el gobierno ya se ha comprometido, de forma tácita, en la fabricación de RNEP, además de considerar el desarrollo de otros tipos de bombas nucleares.

Los nuevos programas despiertan la preocupación entre los partidarios del control de armamento. Aducen éstos que EE.UU. arruinará su liderazgo en la prevención de la proliferación nuclear, a la vez que también podría inducir a otros estados a desarrollar técnicas similares. Edward Kennedy, senador por Massachusetts, advirtió que "un arma nuclear no es un componente más de nuestro arsenal, ni puede tratarse igual". Daryll Kimball, director ejecutivo de la Asociación para el Control de Armas, con sede en Washington D.C., declaró que "la política sobre armas nucleares de la administración Bush, basada en el haz lo que digo pero no lo que hago, va en contra de lo firmado por EE.UU. en el Tratado de No Proliferación, al tiempo que supone una amenaza para el futuro del mismo". Otros han criticado el propio concepto de arma nuclear reducida porque cuesta creer que una explosión nuclear, por "reducida" que sea, pueda rendir beneficios sin sembrar la ruina.

En el fragor del debate sobre esas armas contra objetivos subterráneos se ha pasado por alto una reflexión adecuada en torno a la comparación entre venta-

jas militares y riesgos políticos y diplomáticos. Ciertas opciones alternativas sin ojiva nuclear podrían ofrecer la mayoría de esas mismas prestaciones, si no todas, con un riesgo incidental infinitamente menor, no sólo desde el punto de vista político o humano, sino militar incluso.

¿Nucleares en auxilio?

Algunos ingenieros de armamento han argumentado que las armas nucleares de barrena de bajo rendimiento, estando éste comprendido entre 10 y 1000 toneladas de TNT equivalente, brindarían unas capacidades tácticas y estratégicas excepcionales, a la vez que minimizarían los efectos colaterales indeseados; en particular, la abundante lluvia atómica característica de las bombas más potentes. Pasar de los grandes ingenios nucleares que estallan en la superficie terrestre a otros más pequeños que detonen bajo el suelo podría ciertamente reducir por un factor del orden de 20 la liberación de lluvia radiactiva, pero ni mucho menos convertiría en "limpias" a esas municiones.

Esa nueva generación de bombas de barrena nucleares sería más eficaz contra objetivos subsuperficiales porque una detonación bajo tierra acrecienta la sacudida sísmica que crean las bombas de aviación. Gran parte de la onda de choque producida por un ingenio que estalle en la superficie terrestre, o encima de ésta, se refleja en la interficie suelo-aire. El rebote envía la onda hacia el cielo, alejándola del búnker enterrado. Si una bomba del mismo tamaño se hace estallar bajo tierra, la mayoría de la onda se propaga directamente hacia el blanco. Incluso una penetración de poca cuantía presenta una diferencia enorme en poder destructivo: un artefacto de un kilotón que estalle a un metro bajo el suelo conmociona más a un búnker o almacén enterrados que uno de 20 kilotones que detone en el exterior.

Una explosión nuclear subsuperficial poco profunda produce un extenso cráter, arrasando las instalaciones abarcadas en su radio y todas las que se hallen directamente bajo ella, donde unas fuertes tensiones mecánicas fracturan la tierra. Las dimensiones de la zona destruida, aproximadamente semiesférica, dependen del rendimiento del arma, la profundidad de la detonación y la composición del terreno. Los estratos duros transmiten más eficazmente las ondas de choque que el terreno blando. Por ejemplo, una bomba de un kilotón que detonase a cinco metros de profundidad en granito demolería unos búnkeres de buena construcción a 35 metros bajo el suelo, mientras que una de 10 kilotones que estallase bajo un metro de terreno cultivable tendría un radio destructivo de sólo cinco metros.

Lluvia mortal

Disminuyendo la potencia explosiva necesaria para eliminar un objetivo enterrado, el uso de armas nucleares de barrena reduce la cantidad de lluvia radiactiva incidental. Cuatro científicos del Laboratorio Nacional de Los Alamos (Bryan L. Fearey, Paul C. White, John St. Ledger y John D. Immele) estimaban recientemente en la revista *Comparative Strategy* que el tamaño de una bomba nuclear pequeña que penetrase en tierra unos diez metros antes de estallar podría ser aproximadamente 1/40 del tamaño de otra que detonase en la superficie y, aun así, lograr su objetivo. Al elegir esta bomba de tamaño reducido se dividiría más o menos por 10 la zona afectada por la lluvia radiactiva.

Pero, ¿basta esa reducción para considerar la posibilidad de desplegar bombas nucleares de barrena? Según el informe "Contención de Explosiones Nucleares Subterráneas", de la Oficina del Congreso para Estimaciones Tecnológicas, reprimir completamente la lluvia radiactiva de una bomba nuclear de un kilotón requiere detonarla a 90 metros bajo tierra en una cavidad hermética. Los mejores misiles penetradores actuales llegan sólo hasta unos seis metros de profundidad en roca dura y, tal como sostiene Robert W. Nelson, de la Universidad de Princeton, en *Physics Today*, los límites de las resistencias de los materiales sugieren que 20 metros podría ser un máximo teórico. Esas profundidades podrían ampliarse mediante técnicas de penetración de nuevo cuño, en vez de recurrir a simples misiles (tal como se describe después). Pero no importa hasta dónde excave una bomba, ésta siempre dejará tras de sí un agujero por el que pueda escapar la radiación. Tales cifras dejan pocas dudas sobre la lluvia radiactiva provocada por una bomba nuclear antibúnker; en una zona urbana, una bomba de un kilotón podría matar a decenas de miles de personas.

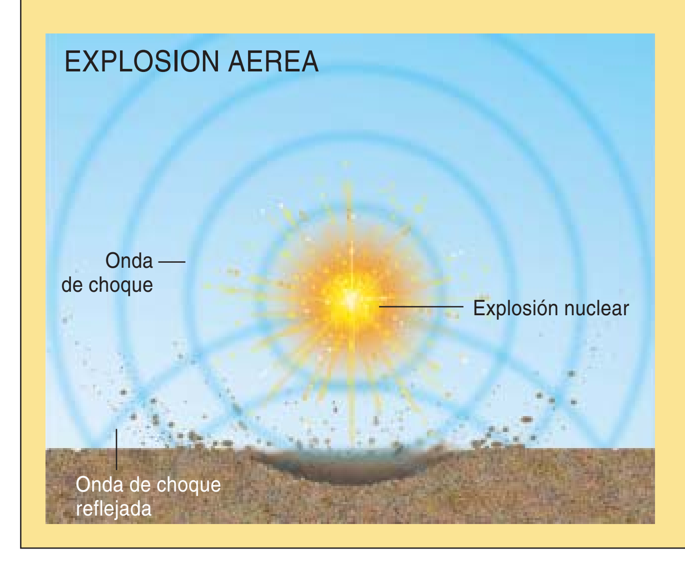
Las armas de tamaño reducido serían quizá más útiles en zonas menos pobladas. Consideremos una bomba antibúnker que estalle a una profundidad moderada —menos de 10 metros— con un viento medio de 10 kilómetros por hora. Aunque los números varían levemente según la profundidad de la detonación, la geología y las peculiaridades del arma, los resultados vienen a ser iguales. Para una población vecina en cuya evacuación se tarden seis horas, los cálculos muestran que la lluvia radiactiva mataría a casi toda persona situada hasta aproximadamente cinco kilómetros del estallido, en la dirección del viento; de la población situada hasta ocho kiló-

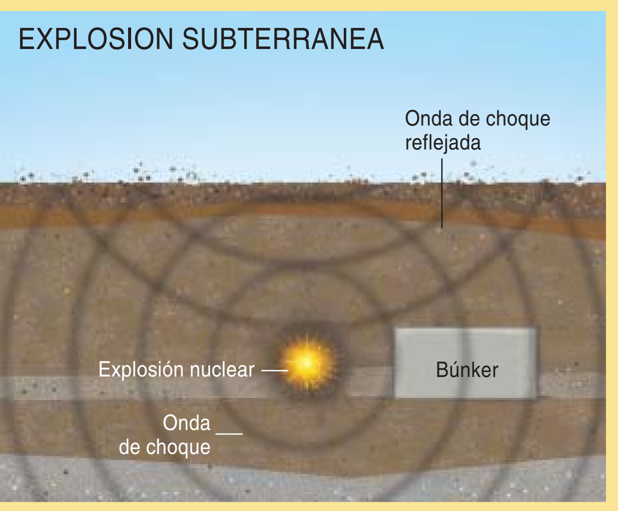
Resumen/Bombas de barrena

- Para contrarrestar la amenaza de las bombas modernas, algunos países han construido búnkeres subterráneos fortificados y enterrado almacenes de armas de destrucción masiva.
- La administración Bush está financiando la investigación sobre armas nucleares de barrena, bombas atómicas antibúnker que penetran en la tierra antes de estallar. Puesto que las explosiones subterráneas ofrecen mayor poder destructivo, se reduciría el tamaño de las bombas y con ello también las emisiones radiactivas.
- Nuevas técnicas antibúnker, sin componente nuclear, podrían reproducir los efectos de los explosivos atómicos subsuperficiales, evitando así los inconvenientes políticos, estratégicos y militares.

FISICA DE LA ZONA DE IMPACTO DE UNA BOMBA

Cuando una bomba estalla en la superficie, o cerca de ésta, la mayor parte de la onda de choque rebota desde el suelo hacia la atmósfera (*izquierda*). El poder destructor de una explosión nuclear contra un blanco subterráneo aumenta drásticamente, sin embargo, si ésta se produce bajo el suelo; en este caso, la onda de choque se transmite, casi de forma íntegra, directamente al blanco enterrado (*derecha*). En consecuencia, una bomba de un solo kilotón que estalle a un metro bajo tierra transmite un impacto mayor a un objetivo subterráneo cercano que otra bomba de 20 kilotones que estalle en la superficie. Tras reventar el búnker, la onda expansiva fisura la superficie, liberando lluvia radiactiva.





KENT SNODGRASS *Precision Graphics*

metros de distancia, moriría la mitad. Sólo si el centro de población más cercano se halla a 10 o más kilómetros en la dirección del viento, las víctimas de la radiación, de haberlas, serían escasas y rápidas.

Aunque las bajas fueran escasas, se contaminarían por radiactividad extensas zonas contiguas al punto de la explosión. Como indicador del nivel de exposición que una persona puede aceptar, tras el desastre de Chernobil, en Ucrania, las autoridades cerraron permanentemente la región cuyos residentes cabía esperar que recibieran una dosis de irradiación de dos rems en el primer año (el rem es la unidad con que se mide el daño medio infligido a los tejidos orgánicos por radiación ionizante). Según este patrón, en la situación anterior habría que reubicar, al menos temporalmente, a toda persona que se hallase hasta 70 kilómetros en la dirección del viento. A treinta kilómetros en dicha dirección, la gente podría regresar después de un mes; a 15 kilómetros, tendría que esperar un año para volver a casa.

La lluvia radiactiva desencadenada por un arma antibúnker podría también complicar las operaciones militares estadounidenses. Las circunstancias pudieran obligar a las tropas propias a aceptar unas dosis de irradiación mayores que a los civiles, pero adicionalmente esas armas podrían crear extensas zonas prohibidas para las operaciones tácticas. El ejército recomienda que las tropas dispuestas a admitir unos niveles "moderados" de riesgo no sean expuestas a una irradiación superior a 70 rems. Suponiendo que las tropas se desplegaran en el área en turnos de 24 horas, la infantería tendría que permanecer al menos a 15 kilómetros de la explosión (en la dirección del viento) hasta una hora tras el ataque y, al menos a cinco kilómetros, durante un día o más. Si las tropas se vieran forzadas a tolerar niveles de exposición de "emergencia" (hasta 150 rems) esas distancias serían de 10 y tres kilómetros, respectivamente (*véase la figura 3*).

Alternativas no nucleares

Las complicaciones derivadas de las radiaciones suscitan la cuestión sobre la existencia de alternativas no nucleares para destruir búnkeres profundos. Algunas técnicas podrían lograrlo, al menos con el tiempo. Una de las actuales armas antibúnker más efectiva es la nueva bomba Big-BLU, que contiene 15 toneladas de explosivo habitual. Mas para conseguir mayor potencia mediante explosivos no nucleares se requiere un incremento notable de la masa, por lo que es improbable que puedan liberar toda la potencia de siquiera un artefacto de un kilotón.

Sin embargo, para compensar en parte ese menor poder destructivo, los ingenieros pueden diseñar una técnica de barrenado que permita a un proyectil no nuclear horadar más y detonar más cerca del blanco. Los misiles que son penetradores cinéticos simples se abren paso por la tierra merced a la violencia que extraen del enorme ímpetu del impacto. Cuanto mayor es ese ímpetu (masa por velocidad) inicial, tanto más tarda el arma en detenerse tras incidir en la superficie. Por consiguiente, el mejor modo de aumentar la profundidad a la que pueden llegar es elevando la velocidad del misil, su longitud (y por ello, su masa) o ambas.

La mayoría de los actuales misiles barrenadores adquieren de la gra-

ARMAS DE BARRENA

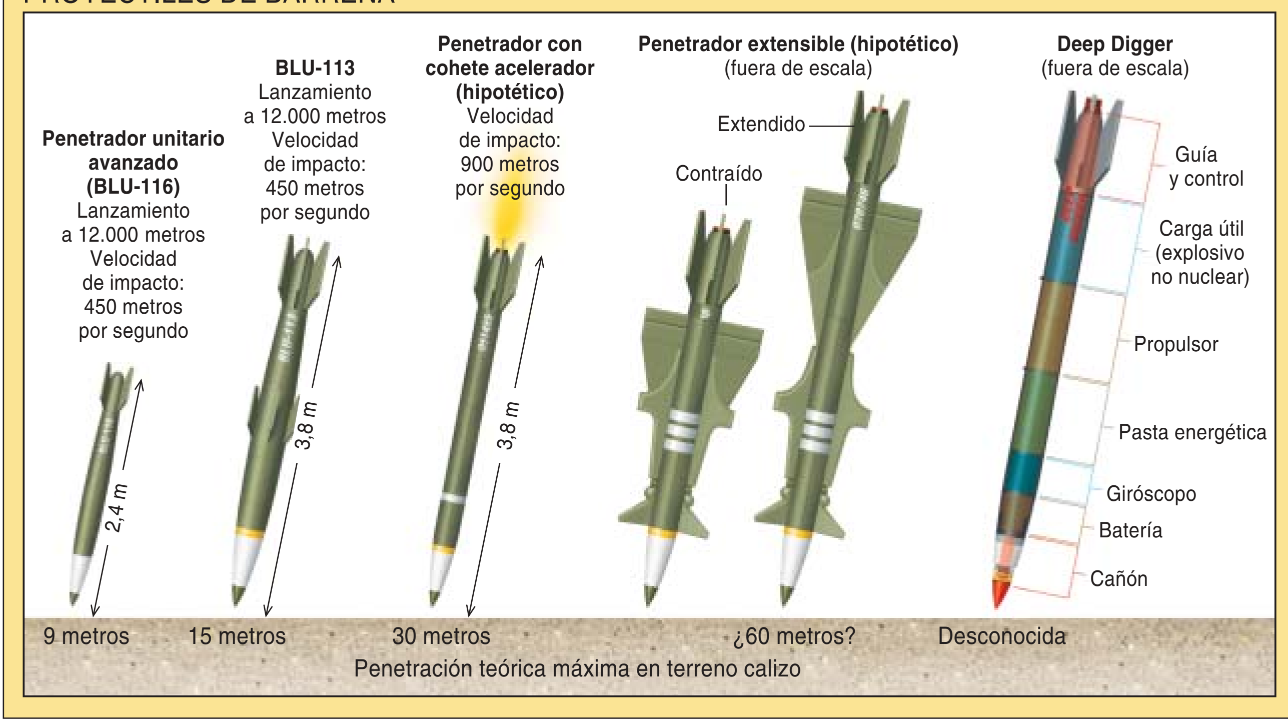
Se desarrollan varias técnicas para dotar a las bombas de mayor penetración en tierra y mejorar su precisión en la destrucción de búnkeres subterráneos. En su mayoría, las municiones de barrena actuales alcanzan sus elevadas velocidades de impacto (unos 450 metros por segundo) merced a la fuerza de la gravedad, pues se dejan caer desde una gran altura (la energía potencial debida al campo gravitatorio se convierte entonces en cinética). Añadiendo cohetes propulsores podrían doblarse estas velocidades —y, por tanto, duplicar también el ímpetu o momento de impacto—, con lo que las bombas penetrarían hasta profundidades un 75 por ciento mayores en granito duro y un 1000 por ciento mayores en suelo blando. Sin embargo, velocidades superiores a los 900 metros por segundo provocarían la desintegración del proyectil en su contacto con una superficie de roca dura. En teoría, al duplicar la longitud de un proyectil (y con ello, su masa) se duplica su profundidad de penetración. En la práctica, no obstante, dicha longitud está limitada por el espacio para carga útil del avión que lo lanza.

Para superar las limitaciones intrínsecas de las técnicas de barrenado cinético (en las que sólo actúa la gravedad), pueden construirse artefactos "activos" que horadan el terreno. El Deep Digger ("excavadora profunda"), aún en desarrollo, ofrece un buen ejemplo de este enfoque. Operaría según principios parecidos a los de la "perforación en seco" de la industria petroquímica. Se basa ésta en la acción de un cabezal metálico oscilante que pulveriza la roca que encuentra a su paso, la cual se expulsa luego mediante gas a altas presiones. En el caso del Deep Digger, la roca se fracturaría con un cañón de tiro rápido.

La imprecisión con que se conoce la profundidad de un búnker puede, asimismo, salvarse mediante una técnica similar a la de la espoleta inteligente para blancos duros ("Hard Target Smart Fuse"), recientemente cancelada por el Pentágono, basada en un acelerómetro que detecta en qué momento el proyectil ha alcanzado su objetivo. A medida que la ojiva pasara del terreno duro al interior del búnker, el sensor de aceleración captaría la variación de resistencia y la espoleta detonaría la carga explosiva sobre el blanco.



PROYECTILES DE BARRENA



KENT SNODGRASS *Precision Graphics*; CORTESIA DE AIR FORCE PHOTO

vedad sus celeridades de impacto (unos 450 metros por segundo). Añadiéndoles cohetes de propulsión, podría doblarse esa velocidad (y con ello, el ímpetu de impacto); ello los impulsaría hasta profundidades de un 75 por ciento más en formaciones graníticas y casi de un 1000 por ciento mayores en suelos blandos. La mayoría de los expertos en misiles consideran inviable aumentar la velocidad más allá de esos límites, pues el misil se desintegraría al incidir en la superficie.

En la mayoría de las condiciones de impacto, al duplicar la longitud de un misil (y por tanto, su ímpetu) se duplica su profundidad de penetración. En la práctica, no obstante, la longitud de un misil suele estar limitada por el espacio para

la carga útil disponible en el avión lanzador. Los cazas pueden transportar sólo bombas más bien cortas; para transportar penetradores más largos y efectivos se precisan bombarderos. Hasta ahora, las municiones de mayor efecto barrena empleadas por las fuerzas armadas de EE.UU. están sometidas al requisito sistemático de que se adapten a una amplia gama de aviones, cazas incluidos. Flexibilizando ese factor limitante, se facilitaría el desarrollo de armas de mayor penetración.

Para superar las limitaciones intrínsecas de las técnicas de barrenado cinético, podrían construirse artefactos activos. Un ejemplo de ello es el Deep Digger, un proyecto en fase de desarrollo. Funcionaría según técnicas parecidas a las de la "perforación en seco" de las industrias petrolera y del gas. La perforación en seco se lleva a cabo con un cabezal metálico oscilante que pulveriza la roca a su paso, que se expulsa luego del pozo de sondeo con gas a alta presión. De diseño similar, el Deep Digger es mucho menor; no pesa miles de toneladas, sino que su masa está entre 50 y 100 kilogramos. Sería un ingenio fácilmente transportable, que podría ser lanzado por fuerzas terrestres o desde el aire. Esta técnica, resulte viable o no, a la postre pone de manifiesto el potencial de las soluciones innovadoras.

Como el radio de destrucción de la explosión de una ojiva tradicional sería mucho menor que el de un arma nuclear, la alternativa no nuclear podría ser menos eficaz si el emplazamiento de un búnker subterráneo no se conociera con exactitud. Por ello, los ingenieros están trabajando en las "bombas de pequeño diámetro", que actúan de modo muy parecido a las municiones subterráneas de racimo: esparcen un gran número de ojivas sobre un área extensa e imitan así el efecto de una carga útil explosiva mucho mayor.

La incertidumbre en torno a la profundidad de un búnker puede, asimismo, salvarse mediante una técnica similar a la de la "espoleta inteligente para blancos duros", que acaba de cancelar el Pentágono. Se basa en un acelerómetro que detecta en qué momento el proyectil ha alcanzado su objetivo. A medida que la ojiva pasara de la dureza del terreno al interior del búnker, el sensor de aceleración iría captando la variación de resistencia y la espoleta detonaría la carga explosiva sobre el blanco.

Desde luego, estas ideas sobre mejoras de la penetración serían también aplicables a la munición nuclear. Pero si una bomba puede lanzarse próxima al búnker objetivo, la potencia explosiva de una ojiva nuclear resultaría, quizá, superflua; bastaría una ojiva común.

NEUTRALIZACION DE ARMAS QUIMICAS Y BIOLOGICAS





KENT SNODGRASS *Precision Graphics*

2. EXPERTOS EN MUNICIONES están desarrollando técnicas que permitan convertir en inertes las armas químicas y biológicas antes de que escapen a la superficie. En esas ojivas especiales suelen combinarse dos mecanismos independientes: materiales de fragmentación o racimos de pequeñas bombas, que, por rotura de los contenedores, expulsan a los agentes químicos o biológicos, seguidos tales materiales por compuestos químicos o incendiarios, que neutralizan las sustancias tóxicas.

Anulación funcional

Podrían aducir algunos que, en el fondo, las técnicas de barrenado actuales resultan insuficientes para que las ojivas habituales destruyan búnkeres profundos. Cierto. Pero hay también búnkeres demasiado hondos —los enterrados varios cientos de metros— para que los aniquilen las bombas nucleares más potentes. Y lo que reviste mayor importancia, no siempre resulta estratégicamente necesaria la destrucción de bases operativas subsuperficiales. A menudo, puede que convenga dejar un búnker intacto, para que luego lo examine el servicio de inteligencia militar. En tales casos, lo que se pretende es la anulación funcional: inutilizar el objetivo sin destruirlo.

Cegar los accesos de un sistema de túneles suele ser la mejor forma de dejarlo inservible. Los misiles crucero lanzados desde lejos y cargas colocadas por fuerzas especiales pueden colapsar las entradas y bloquear todo lo que encierre una instalación. Subrayan algunos comentaristas la dificultad de localizar las entradas de los túneles, pero todavía resulta más complicado dar con los búnkeres.

Contra instalaciones de estado mayor, el cegado de túneles no constituye la estrategia más acertada. Aunque se bloqueen todos los accesos, pueden permanecer indemnes las líneas de comunicaciones, permitiendo que la base siga operativa. Para destruir o paralizar las líneas eléctricas y de comunicaciones que conducen al objetivo, puede que las fuerzas armadas deban recurrir al bombardeo real o a la bomba E del Pentágono, que emite un potente pulso de microondas. Por tanto, si lo que se pretende es dejar un búnker fuera de servicio, no parece recomendable un ataque nuclear.

Neutralizar armas químicas y biológicas

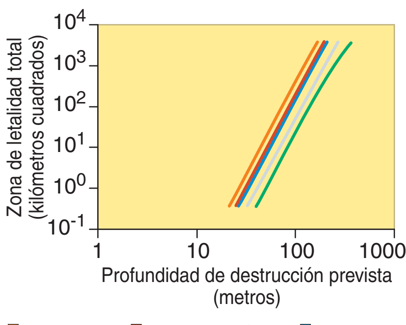
Todas esas técnicas no nucleares sugieren que la destrucción o inutili-

zación de búnkeres y depósitos de armas, reforzados y enterrados, pueden efectuarse sin bombas nucleares. Los defensores de las armas nucleares antibúnker contraargumentan con el razonamiento siguiente: los misiles de cabeza atómica empleados contra depósitos de armas o laboratorios camuflados bajo tierra podrían neutralizar agentes químicos y biológicos, que un explosivo normal quizá sólo dispersaría. Los daños colaterales serían entonces menores, aducen, porque las bajas causadas por lluvia radiactiva quedarían compensadas por una menor mortandad debida a la fuga de dichos agentes. En principio, este punto de vista podría resultar válido; pero la realidad es harto más compleja.

Las armas nucleares destruirían las sustancias químicas y biológicas reventando sus contendores y calentándolas de inmediato. Para neutralizar la mayoría de los agentes biológicos, bastan temperaturas moderadas de unos 200 ºC (el carbunco en polvo necesita 50 grados más) aplicadas durante decenas de milisegundos; condiciones éstas que un arma nuclear alcanza sin dificultad. Si una bomba nuclear explota en el mismo búnker que guarda el bioagente objetivo, podemos dar por seguro que ese almacén quedará eliminado; pero si estalla fuera del búnker, en la roca circundante, ¿neutralizará todos los agentes biológicos que expulsa en forma de lluvia de residuos? La cuestión sigue abierta a la investigación y el debate.

Por contra, eliminar los agentes químicos entraña mayor dificultad. Para romper las fuertes interacciones que mantienen unidos a los átomos deben aplicarse, durante un segundo, temperaturas superiores a los 1000 ºC. Aunque en las inmediaciones de la bomba nuclear —cuestión de metros para una ojiva de un kilotón— se alcanza esa temperatura, no ocurre lo mismo en las zonas más alejadas; por tanto, las municiones químicas que se hallen apartadas probablemente se libren de la destrucción. Por desgracia, tales sustancias exentas podrían dispersarse en una explosión de intensidad suficiente.

ESTIMACION DEL EFECTO LETAL



3. CUANTO MAS PROFUNDO SE HALLA EL BUNKER que se pretende alcanzar con una bomba nuclear, más extensa es la zona exterior afectada por dosis letales de radiación; la proporción es geométrica. La composición del suelo también constituye un factor decisivo. En este cálculo se supone que sólo se tardan tres horas en evacuar la población civil vecina.

Entre tanto, diversas innovaciones podrían reforzar la capacidad de las ojivas no nucleares para neutralizar armas químicas. Los ingenieros militares están desarrollando técnicas de destrucción de agentes, que convierten en inertes dichas sustancias peligrosas antes de que puedan escapar a la zona circundante. Combinan éstas mecanismos independientes: a los materiales de fragmentación o racimos de pequeñas bombas que rompen los contenedores, les siguen compuestos químicos o incendiarios que neutralizan las sustancias tóxicas.

Nivel de riesgo a las 24 horas del ataque

	Riesgo de emergencia	Posibilidad de víctimas
Bomba de 1 kilotón	3 kilómetros	2 kilómetros
Bomba de 1 megatón	100 kilómetros	55 kilómetros

4. TRAS EL EMPLEO DE UN ARMA ANTIBUKER NUCLEAR, las tropas encontrarían complicaciones para su despliegue. Si aguardaran un día entero antes de acercarse a la zona objetivo y trabajaran en turnos de 24 horas ¿a qué distancia, en la dirección del viento, de la zona cero deberían permanecer para estar a salvo? La tabla indica la distancia hasta las zonas seguras, en función del rendimiento de la bomba y de la exposición radiológica tolerada por los soldados. Por ejemplo, una persona dispuesta a entrar en la zona afectada al cabo de una hora de un ataque con una bomba de un kilotón, que aceptara un nivel de riesgo de "emergencia", debería permanecer alejado al menos tres kilómetros en la dirección del viento.

Los explosivos que mezclan combustible y aire (que liberan una combinación de calor extremo y presión sostenida), así como las armas incendiarias, pueden mantener fácilmente los 200 ºC que se requieren para destruir agentes biológicos; pero no los 1000 ºC necesarios para convertir en inertes numerosos compuestos nocivos. Por tanto, los explosivos más adecuados para neutralizar agentes químicos serán los que contengan sustancias que, al reaccionar con éstos, liberen productos inocuos.

¿A favor o en contra?

Se ha expuesto hasta aquí un compendio de los problemas asociados al uso de armas antibúnker nucleares, junto con algunas de las posibles opciones alternativas. Sin embargo, no todas las cuestiones conciernen al campo de batalla. Pensemos en las pruebas nucleares. ¿Pueden desarrollarse nuevas armas tácticas sin reanudar los ensayos?

Algunas de las nuevas técnicas podrían desarrollarse sin recurrir a experimentos reales. Por ejemplo, podrían diseñarse armas antibúnker nucleares rudimentarias mediante simulaciones por ordenador, ensayos de campo no nucleares y datos experimentales ya existentes. Para hacerse una idea de la enorme deceleración que sufre un arma en el impacto, los ingenieros podrían sacar provecho de la experiencia con las granadas nucleares disparadas por la artillería de campaña. Aun así, el ministerio de defensa podría resistirse a confiar plenamente en un arma que no haya pasado por una contrastación real.

Las técnicas nucleares de neutralización de agentes químicos y biológicos sí deberían, en cambio, ensayarse mediante experimentos de campo, pues se requiere un cono-

JOHNNY JOHNSON

EL DEBATE POLITICO SOBRE ARMAS NUCLEARES PEQUEÑAS

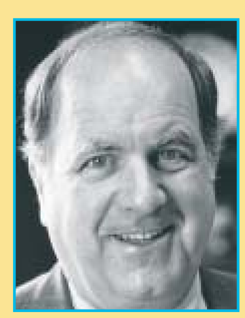
A lo largo de los últimos diez años, uno de los principales obstáculos para el desarrollo de armas nucleares en EE.UU. no era técnico, sino legal. Para que Estados Unidos pudiera contar con esas armas, el Congreso debería revocar antes una ley que prohibía su creación.

En 1993, el Congreso promulgó una ley —la interdicción “Spratt-Furse”— que prohibía cualquier investigación orientada a desarrollar nuevas armas nucleares pequeñas, de rendimiento inferior a cinco kilotones. Encabezado por los representantes John Spratt, de Carolina del Sur, y Elizabeth Furse, de Oregón, el legislativo perseguía continuar en la moratoria sobre pruebas nucleares. Con ello se pretendía también poner freno a los incipientes esfuerzos para iniciar una nueva generación de armas nucleares.

Pese a varios intentos de derogar la interdicción Spratt-Furse, ésta siguió vigente hasta principios de 2003. En ese momento, el presidente George W. Bush solicitó al Congreso la revocación de la ley. Sostenía el ejecutivo que las armas nucleares de bajo rendimiento explosivo se contaban entre las estrategias más prometedoras para disuadir a sus enemigos potenciales, porque disminuyen los riesgos para la población civil. Aducían que para que los expertos pudieran decidir con conocimiento de causa si recomendaban o no el uso de dichas armas, debían antes evaluar sus prestaciones, lo cual requería anular la ley que prohibía su investigación.

En la opinión de los estrategas, la actual ventaja nuclear estadounidense no servía para mantener a los otros países a raya. ¿Por qué un enemigo cualquiera iba a creer que EE.UU. emplearía sus grandes municiones nucleares sabiendo que la consiguiente lluvia radiactiva pondría en peligro a tantos civiles? En lugar de eso, cabía la posibilidad de que un enemigo decidiera atacar a EE.UU. impunemente. Sin embargo, unas armas nucleares menos potentes resultarían más domeñables y, por tanto, constituirían un freno disuasorio más convincente.

Hasta 2003, una magra mayoría de congresistas estaban a favor de mantener la interdicción Spratt-Furse. Sostenían que esas bombas nucleares pequeñas causarían mayor desestabilización, pues los responsables se preocuparían menos de los daños colaterales y, por tanto, sería más probable que decidieran emplearlas. Además, difuminarían la frontera que hoy separa las armas nucleares de las no nucleares; ambigüedad ésta que debilitaría los esfuerzos internacionales en contra de la proliferación del armamento nuclear. Cualquier uso de armas nucleares contribuiría a extender el uso de todo tipo de armamento.



JOHN SPRATT



ELIZABETH FURSE

Algunos partidarios de la prohibición sostenían que esta nueva generación de armas requerirían pruebas que certificaran su operatividad. Según esa línea de razonamiento, la derogación de la interdicción Spratt-Furse constituiría el primer paso hacia la reanudación de los ensayos nucleares y, por ello, una amenaza para los esfuerzos internacionales sobre el control de armamento.

En mayo de 2003, en una apretada votación, la interdicción Spratt-Furse fue derogada. Meses después, en diciembre, Linton Brooks, gerente de la Administración Nacional para la Seguridad Nuclear, hacía llegar a los laboratorios de armas nucleares un memorandum que los instaba a “no desaprovechar esta oportunidad” para explorar nuevos diseños.

cimiento pleno de la interacción entre los efectos mecánicos y térmicos de la explosión y las sustancias diana. Durante la guerra fría se idearon municiones para destruir búnkeres, pero no para eliminar armas químicas y biológicas. La consiguiente escasez de datos experimentales constituiría una rémora para el desarrollo, que sólo podría proseguir mediante ensayos.

Sus defensores consideran de necesidad militar las armas antibúnker nucleares. Para sus adversarios, carecen de utilidad. La realidad es más poliédrica. Comparadas con las mejores armas tradicionales, las bombas antibúnker sí ofrecen ventajas sobresalientes, aunque menos de las que sus partidarios sugieren.

El autor

Michael A. Levi investiga en el departamento de estudios de política exterior en la Institución Brookings de Washington D.C. Físico de formación, dedica su atención al empleo de las armas nucleares y el terrorismo nuclear. Agradece la colaboración de Josh Kellar en la fase inicial de este artículo.

Bibliografía complementaria

LOW-YIELD EARTH-PENETRATING NUCLEAR WEAPONS. Robert W. Nelson en *Science and Global Security*, vol. 10, n.º 1, págs. 1-20; enero 2002.

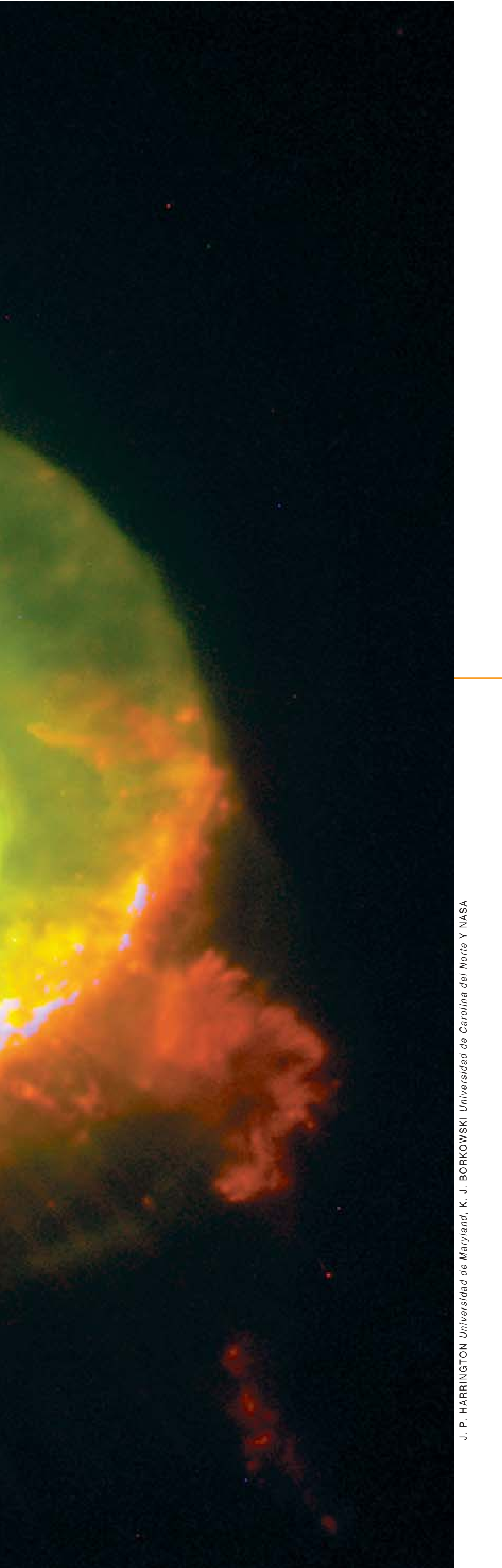
FIRE IN THE HOLE: NUCLEAR AND NON-NUCLEAR OPTIONS FOR COUNTERPROLIFERATION. Michael Levi. Documento de trabajo n.º 31, 2002, Fundación Carnegie para la Paz Internacional.

EFFECTIVENESS OF NUCLEAR WEAPONS AGAINST BURIED BIOLOGICAL AGENTS. Michael May y Zachary Haldeman. Informe del Centro Stanford para la Seguridad y Cooperación Internacionales, junio 2003.

AN ANALYSIS OF REDUCED COLLATERAL DAMAGE NUCLEAR WEAPONS. Bryant L. Fearey, Paul C. White, John St. Ledger y John D. Immle en *Comparative Strategy*, vol. 22, n.º 4, págs. 305-324; octubre/noviembre 2003.



LA NEBULOSA DEL OJO DE GATO (NGC 6543) es una de las nebulosas planetarias más singulares de la galaxia. Se trata de un conglomerado polícromo de múltiples capas de gas que se halla a 3000 años-luz del Sol. Las nebulosas planetarias no tienen nada que ver con los planetas; el nombre es un vestigio histórico. Representan la muerte lenta de las estrellas de tamaño modesto. Nuestro propio Sol terminará su vida de una forma parecida. La complejidad del Ojo de Gato, tal y como la captó el Telescopio Espacial Hubble en 1994, obligó a los astrónomos a buscar nuevas explicaciones.



J. P. HARRINGTON *Universidad de Maryland*, K. J. BORKOWSKI *Universidad de Carolina del Norte* Y NASA

La muerte de las estrellas comunes

La muerte del Sol, dentro de cinco mil millones de años, será un espectáculo maravilloso. Al igual que otras estrellas de su misma naturaleza, engendrará una de las más bellas estructuras de la naturaleza: una nebulosa planetaria

Bruce Balick y Adam Frank

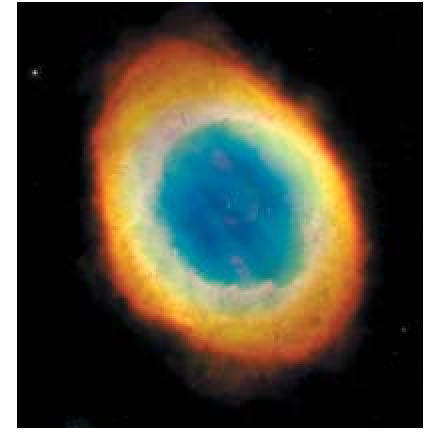
Desde la facultad de astronomía de la Universidad de Washington se ve el taller del escultor en vidrio Dale Chihuly. Las figuras fluidas y brillantes que crea recuerdan a criaturas submarinas. Cuando se las ilumina en una habitación a oscuras, el baile de la luz a través de sus vítreas formas les da vida. Medusas amarillas y rojizos pulpos vuelan por aguas de color cobalto. Algas de las profundidades se balancean con las mareas. Moluscos iridiscentes se abrazan.

Otras evocaciones suscitan en los astrónomos las obras de Chihuly. Pocas creaciones humanas se asemejarán tanto a las hermosas estructuras celestes que conocen por nebulosas planetarias. Contra el fondo negro del universo, encendidas desde su interior por estrellas esquilmadas, coloreadas por la fluorescencia que generan átomos y iones radiantes, las nebulosas planetarias parecen vivas. A algunas se les han dado nombres sugerentes: Hormiga, Estrellas Gemelas de Mar u Ojo de Gato. No hay imágenes espaciales más cautivadoras que las que de ellas ha tomado el Telescopio Espacial Hubble.

Las nebulosas planetarias recibieron esta denominación, nada afortunada, hace dos siglos. Las bautizó así William Herschel, prolífico descubridor de nebulosas, objetos difusos con forma de nube, visibles sólo a través de un telescopio. Muchas presentan un aspecto vagamente circular, que a Herschel le re-

cordaba al verdoso planeta Urano (que él mismo había descubierto). De ahí que conjeturase que quizá fuesen sistemas planetarios que iban configurándose alrededor de estrellas jóvenes. El nombre ha perdurado a pesar de que da a entender lo contrario de lo que en realidad sucede: esta clase de nebulosa está formada por gas que se desprende de estrellas moribundas. No representan nuestro pasado, sino nuestro destino. En unos cinco mil millones de años, el Sol acabará sus días con la elegante violencia de una nebulosa planetaria.

Al igual que el arte de verdad grande, las nebulosas planetarias no sólo nos cautivan. Nos obligan a poner en entredicho nuestra percepción del mundo. En concreto, desafían a la teoría de la evolución estelar, rama madura, y se supone que bien desarrollada, de la ciencia, uno de los pilares en que se apoya nuestro conocimiento del cosmos. Y, sin embargo, le cuesta explicar las estructuras complejas que se observan en las imágenes del Hubble. Si las estrellas nacen, viven y mueren redondas, ¿cómo crean formas tan elaboradas que recuerden a hormigas, estrellas de mar u ojos de gato?



Nebulosa del Anillo (M 57)

La muerte les sienta bien

A lo largo del siglo pasado, quedó claro que las estrellas se dividen a su muerte en dos clases muy diferentes. Las de masa muy grande, en concreto las que al nacer tienen una masa al menos ocho veces la solar, estallan repentinamente como supernovas. Las que no llegan a tanto, como el Sol, tienen una muerte prolongada. En lugar de explotar, pasan los últimos años de su vida quemando combustible de manera irregular, como a espasmos, igual que el motor de un coche al que se le está acabando la gasolina.

Las reacciones nucleares en el interior de una estrella de éstas —la fuente de su energía durante casi toda su vida— consumen primero el hidrógeno disponible y después el helio. A medida que la quema nuclear se desplaza hacia afuera en busca del material fresco que envuelve al núcleo, la estrella se dilata y pasa a la fase de gigante roja. Cuando también se ha consumido el hidrógeno de la envoltura, se empieza a fusionar el helio. Este proceso es muy inestable. Las fuertes convulsiones, combinadas con la intensa presión de radiación y otras fuerzas, empujan las dilatadas capas superficiales, débilmente ligadas al astro, hacia el espacio. Nace así la nebulosa planetaria.

Desde el siglo XVIII se han representado y catalogado unas 1500 nebulosas planetarias; puede que haya diez mil más escondidas tras las espesas nubes de polvo de nuestra galaxia. Mientras que en la Vía Láctea estalla una supernova cada pocos siglos, cada año nace una nebulosa planetaria y se apagan cientos de nebulosas viejas. Las supernovas brillan más, pero sus escombros, turbios y caóticos, carecen de la simetría y complejidad de las nebulosas planetarias.

Las nebulosas planetarias no son tan etéreas y pacíficas como sugieren las imágenes. Muy al contrario, son pesadas y tempestuosas. Contiene cada una alrededor de un tercio de masa solar, con casi todo el combustible nuclear que la estrella no haya llegado a quemar. Al principio, las capas más exteriores y menos firmes de la estrella se desprenden a velocidades de unos 10 a 20 kilómetros por segundo. Este viento no muy rápido acarrea con el tiempo la mayor parte de la masa de la nebulosa. A medida que la estrella se desnuda y descubre su núcleo todavía caliente, pasa del color naranja al amarillo, después al blanco y finalmente al azul. Cuando la temperatura superficial supera los 25.000 kelvin, baña con una intensa luz ultravioleta el gas que la rodea, hasta romper sus moléculas y separar los electrones de los átomos.

El viento estelar transporta una masa cada vez menor a una velocidad cada vez mayor. Pasados entre cien mil y un millón de años, dependiendo de la masa estelar original, cesa el viento por completo; lo que queda de la estrella se ha convertido en una enana blanca muy densa y caliente, un rescoldo estelar esférico, casi cristalino, al que la gravedad ha reducido a un tamaño parecido al de la Tierra.

Puesto que las fuerzas que se supone arrancan materia de las estrellas moribundas tienen simetría esférica, hasta el decenio de 1980 se pensó que las nebulosas planetarias eran burbujas que se expandían de manera esférica. Desde entonces, nuestras ideas al respecto se han ido complicando más y más y, a la par, se han vuelto más interesantes.

Los vientos interactivos

El primer indicio de que las nebulosas planetarias son más que un simple eructo estelar se descubrió en 1978, cuando las observaciones

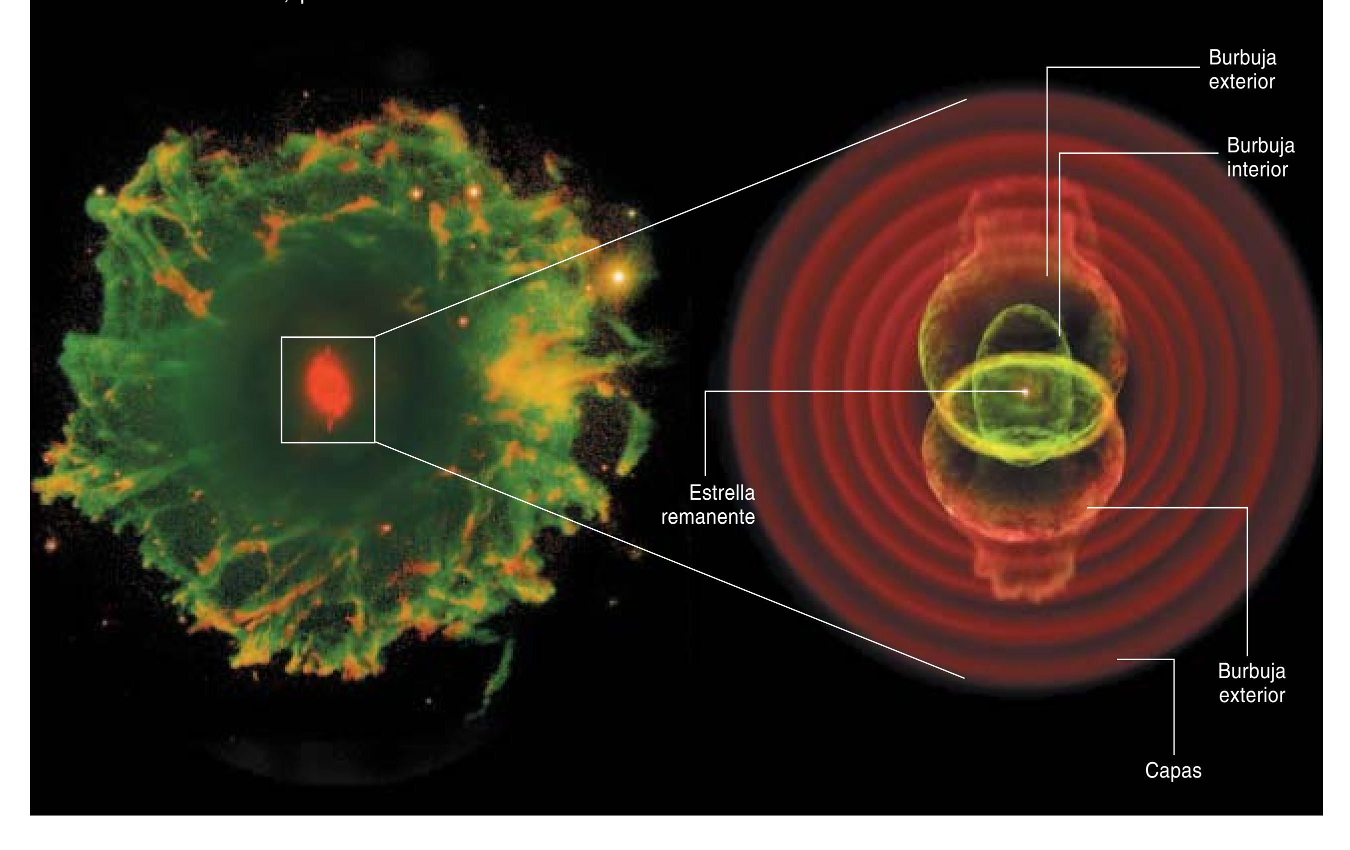
Resumen/Nebulosas planetarias

- Las nebulosas planetarias son los polícromos residuos de estrellas que tenían menos de ocho masas solares. En su agonía, estas estrellas fueron perdiendo sus capas exteriores, expulsadas por vientos con velocidades de hasta mil kilómetros por segundo. Con el tiempo, de estas estrellas no quedan más que las capas más profundas y calientes. Su luz ultravioleta ioniza el viento y lo vuelve fluorescente.
- El Telescopio Espacial Hubble ha observado nebulosas de estructura muy compleja. Sólo se tiene una idea vaga de cómo se construyen. Los campos magnéticos atrapados en el núcleo estelar, pero arrastrados al exterior por el viento, podrían desempeñar una función decisiva, al igual que las estrellas compañeras o los planetas gigantes, cuyas fuerzas de marea transfieren el gas a grandes anillos que, a su vez, configuran el viento como un reloj de arena.

NASA/ESA Y J. HESTER *Universidad del Estado de Arizona*; NASA Y PATRIMONIO DEL HUBBLE (STScI/AURA)

DISECCION DEL OJO DE GATO

La imagen de las páginas precedentes muestra sólo parte del esplendor de Ojo de Gato. Vista por un telescopio terrestre (*izquierda*), se perciben unas "pestañas", una banda exterior, desgarrada, de gas. La región más interna, o "pupila", reconstruida artísticamente a la derecha, presenta la estrella remanente encerrada en una capa de gas oblonga, rodeada a su vez por dos burbujas descentradas y todo ello envuelto por capas gaseosas concéntricas. Es evidente que la estrella ha expulsado material en distintos momentos de milenios pasados. La parte superior de la nebulosa está inclinada hacia el observador.



R. CORRADI *Instituto de Astrofísica de Canarias* (*izquierda*); DON DIXON (*derecha*)

en el ultravioleta mostraron que las estrellas moribundas siguen expeliendo vientos mucho después de haber perdido las capas gaseosas más exteriores. Aunque muy tenues, esos vientos tardíos llegan a alcanzar los mil kilómetros por segundo, velocidad unas cien veces mayor que la de los vientos densos que los precedieron.

Con el fin de explicar el efecto de esos vientos, Sun Kwok, de la Universidad de Calgary, Christopher R. Purton, del Radiobservatorio Astrofísico del Dominio canadiense, y M. Pim Fitzgerald, de la Universidad de Waterloo, tomaron prestados unos modelos de vientos estelares que se habían concebido para otros fenómenos astrofísicos. La idea es la siguiente: cuando los vientos rápidos chocan contra los vientos más lentos de corriente abajo, se forma en la superficie de contacto un borde denso de gas comprimido, como la nieve que se agolpa frente a la pala de una quitanieves. El borde de gas rodea una cavidad casi vacía (pero muy caliente) que, con el tiempo, el viento rápido limpia y hace crecer en volumen.

Este modelo, la "hipótesis de los vientos estelares interactivos", funciona bien para las nebulosas planetarias redondas o casi redondas. Pero durante los años ochenta se vio que las nebulosas redondas son más bien la excepción; no constituyen ni el 10 % de la población total de nebulosas planetarias. La inmensa mayoría son oblongas, como un huevo. Las más espectaculares, aunque también de las más raras, constan de dos burbujas en lados opuestos de la estrella moribunda. Los astrónomos las llaman "bipolares". "Mariposa" o "reloj de arena" serían apelativos más expresivos.

Para explicar estas estructuras, extendimos, junto con Vincent Icke y Garrelt Mellema, entonces en la Universidad de Leiden, la hipótesis de los vientos interactivos. Supongamos que los vientos lentos forman primero un toro denso en órbita alrededor del ecuador de la estrella. Más tarde, este toro desviará los vientos en una dirección polar. Así se engendrará una nebulosa elíptica. Las que recuerdan a un reloj de arena serían aquellas con toros muy densos y ajustados. El toro actuaría como una tobera, al igual que cuando silbamos nuestros labios coliman la exhalación en una corriente fina de aire; el toro desviaría los vientos rápidos y produciría imágenes dobles de chorros o corrientes de gas en forma de reloj de arena.

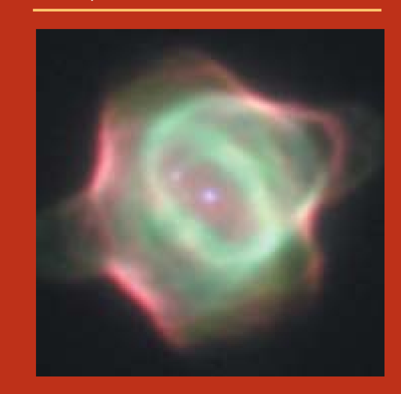
El modelo era muy sencillo, y reproducía bien todas las imágenes

El arte de las nebulosas planetarias

El Telescopio Espacial Hubble ha demostrado que las nebulosas planetarias son más complejas y variadas de lo que los teóricos esperaban.

La estrella central de la nebulosa de la Chinche (NGC 6302) es una de las más calientes que se conocen. Está encerrada en un toro denso, polvoriento y rico en carbono (*arriba a la derecha*).

La nebulosa de la Raya (Hen 3-1357), la más joven de todas las nebulosas planetarias conocidas, brilla sólo desde hace 20 años. Una estrella compañera y un toro de gas podrían explicar su aspecto.





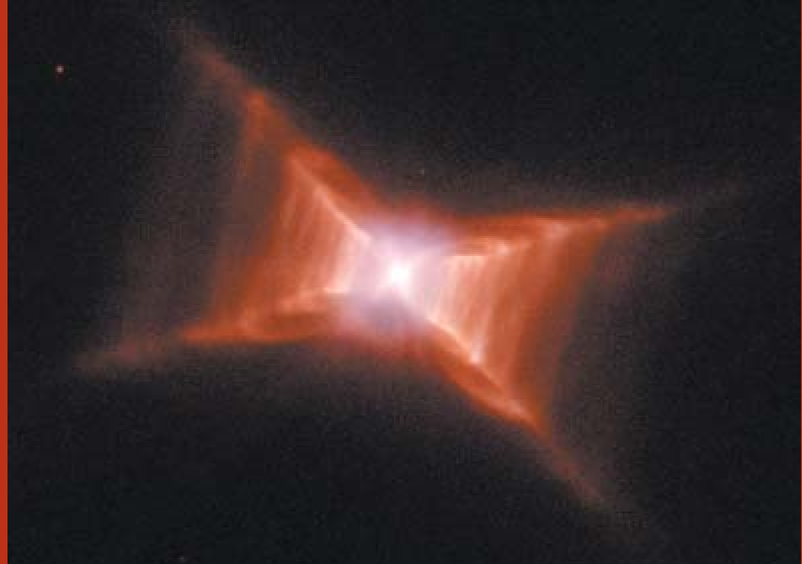


La nebulosa Bola de Nieve Azul (NGC 7662) contiene “FLIERS” (*manchas rojas*), grumos de gas de alta velocidad y baja ionización de origen incierto.



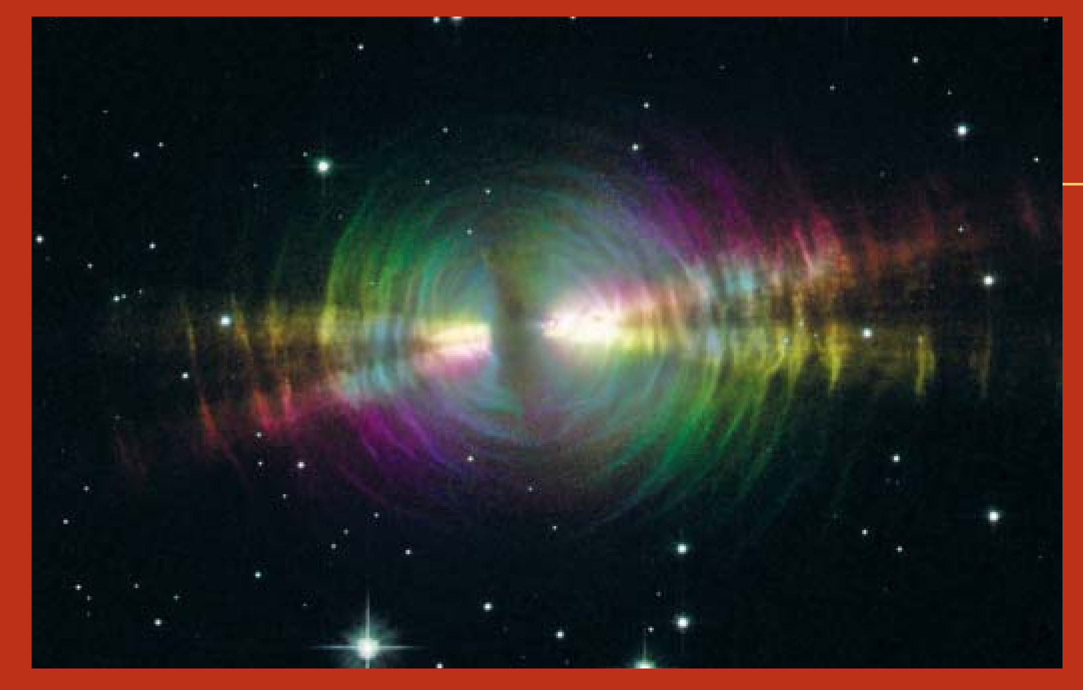
En el centro de la nebulosa de los Chorros Gemelos (M 2-9) se encuentran un sistema binario de estrellas y un disco gaseoso de diámetro 10 veces mayor que la órbita de Plutón. El azul corresponde a los iones de hidrógeno; el rojo, a los átomos de oxígeno; el verde, a los iones de nitrógeno.



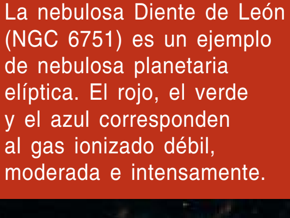


El gas sale de la estrella central de la nebulosa de la Hormiga (Menzel 3) a una velocidad de 1000 kilómetros por segundo.

La nebulosa del Rectángulo Rojo (HD 44179) parece cajas dentro de cajas porque estamos viendo de lado conos anidados de gas.

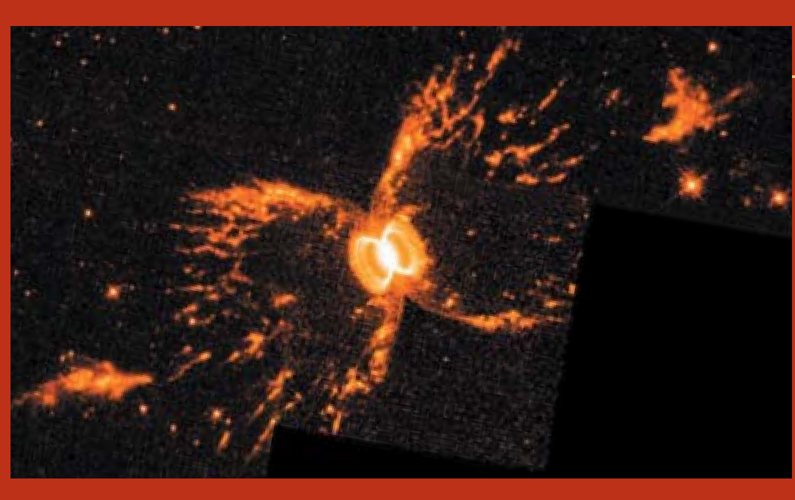


Al igual que un faro, la estrella central de la nebulosa del Huevo (CRL 2688) ilumina las capas de polvo concéntricas, que se extienden hasta un décimo de año-luz de la estrella. Los colores representan luz polarizada en diferentes direcciones.



La nebulosa Diente de León (NGC 6751) es un ejemplo de nebulosa planetaria elíptica. El rojo, el verde y el azul corresponden al gas ionizado débil, moderada e intensamente.





Esta imagen de la nebulosa del Cangrejo del Sur (He2-104), que capta el resplandor del nitrógeno gaseoso, revela la presencia de una nebulosa brillante y pequeña dentro de otra mayor. La gigante roja que generó la nebulosa tiene por compañera a una estrella enana blanca.

ESA/NASA Y A. ZIJLSTRA *Universidad de Manchester* (*Chinche*); M. BOBROWSKY *Orbital Sciences Corp.* Y NASA (*Raya*); B. BALICK Y J. ALEXANDER *Universidad de Washington*, A. HAJIAN *Observatorio de la Marina*, EE.UU., Y. TERZIAN *Universidad de Cornell*, M. PERINOTTO *Universidad de Florencia*, P. PATRIARCHI *Observatorio de Arcetri* Y NASA (*Bola de Nieve Azul*); B. BALICK, V. ICKE *Universidad de Leiden*, G. MELLEMA *Universidad de Estocolmo* Y NASA (*Chorros Gemelos*); NASA/ESA Y PATRIMONIO DEL HUBBLE (STScI/AURA) (*Hormiga*); NASA/ESA, H. VAN WINCKEL *Universidad Católica de Lovaina* Y M. COHEN *Universidad de California en Berkeley* (*Rectángulo Rojo*); NASA Y PATRIMONIO DEL HUBBLE (STScI/AURA) (*Huevo*); NASA Y PATRIMONIO DEL HUBBLE (STScI/AURA) (*Diente de León*); R. CORRADI *Instituto de Astrofísica de Canarias*, M. LIVIO STSCI, B. BALICK, U. MUNARI *Observatorio Astronómico de Padua/Asiago*, H. SCHWARZ *Telescopio Optico Nórdico* Y NASA (*Cangrejo del Sur*).

Terracota

Las nebulosas planetarias ilustran el futuro de nuestro propio sistema solar. Cuando el Sol alcance el penúltimo momento de su vida, crecerá hasta la órbita actual de la Tierra. Incinerará Mercurio y Venus. La Tierra escapará a este infortunio porque, al haber expelido el Sol parte de su masa, su fuerza de gravedad se habrá debilitado y nuestro planeta se habrá trasladado a una nueva órbita, mayor que la actual. El Sol, de color ocre-rojizo, llenará el cielo del mediodía. Mientras uno de los bordes se pone por el oeste, el otro empezará a salir por el este. Aunque bastante más frío que hoy día (unos 2000 kelvin frente a 5800 kelvin), el Sol cocerá la superficie del planeta.

La Tierra será entonces testigo desde dentro de la formación de una nebulosa planetaria. El Sol expulsará sus capas más exteriores —una versión extrema del viento solar actual—. Con el tiempo, la gigante roja irá perdiendo capas hasta que no quede de ellas más que el núcleo: se habrá convertido en una enana blanca. Alumbrados por esa incandescente mota azul en el cielo, los objetos de la Tierra proyectarán sombras muy perfiladas, negras como el azabache; la salida y la puesta del Sol no llevarán más de un abrir y cerrar de ojos. La piedra expuesta a la iluminación se convertirá en un plasma porque la radiación ultravioleta de la enana blanca destrozará cualquier enlace molecular. La superficie se cubrirá con una niebla iridiscente que no dejará de ascender y arremolinarse. A medida que la enana vaya radiando su energía, se irá enfriando y debilitando hasta convertirse en ceniza fría y oscura. Nuestro mundo terminará primero como fuego y después como hielo.

La Tierra futura, calcinada por la gigante roja en que se convertirá el Sol, disfrutará al menos de un lugar privilegiado para observar el nacimiento de una nebulosa planetaria.

RON MILLER

de que se dispuso hasta 1993. Las simulaciones por ordenador probaron la viabilidad de la idea básica y nuevas observaciones comprobaron que los vientos lentos parecían, en efecto, más densos cerca del ecuador. No intentamos explicar por qué el viento lento se expulsaba en forma de toro, con la esperanza de que los detalles se pudieran completar más adelante.

Nuestra fe en este modelo sufrió pronto un duro revés. En 1994 el telescopio Hubble tomó la primera imagen clara de una nebulosa planetaria, el Ojo de Gato (NGC 6543), descubierta por Herschel. Esa fatídica imagen tiró por tierra nuestra confianza. Una de sus dos elipses cruzadas, un borde fino que rodea a una cavidad elipsoidal, concordaba con el modelo. Pero, ¿qué eran las demás estructuras? Nadie había predicho que la nebulosa estuviese salpicada de coágulos rojizos; más extraños aún eran las bandas o chorros que tenía justo afuera. El modelo de los vientos interactivos sería correcto, en el mejor de los casos, sólo en parte.

Los teóricos se las ven y desean

Es difícil derribar una idea científica muy enraizada, incluso cuando ha de enfrentarse a imágenes como las obtenidas por el Hubble. Hicimos caso omiso, con la esperanza de que el Ojo de Gato fuese una anomalía. Pero no lo era. Otras imágenes del Hubble establecieron, sin lugar a dudas, que habíamos olvidado algún aspecto fundamental de la muerte de las estrellas. Vanidades heridas aparte, nada mejor pudo pasarles a los científicos. Cuando a tus pies se extienden las ruinas de las ideas más queridas, la naturaleza te desafía a que mires de nuevo: ¿qué has pasado por alto? ¿En qué no has pensado antes?

Cuado se sufre una situación así, ayuda centrarse en los casos más extremos, porque ahí es quizá donde las fuerzas desconocidas actúan con mayor claridad. Entre las nebulosas planetarias, extremos son los objetos bipolares. Las imágenes que de ellos tomó el Hubble recuerdan a las flores que pintaba Georgia O'Keefe. Estructuras redondeadas apreciables a pequeña escala aparecen a cada lado de las nebulosas, como si fueran reflejos especula-

res. Esta simetría de reflexión implica que toda la estructura se formó coherentemente mediante procesos organizados que actuaron cerca de la superficie estelar. Guarda semejanza con la generación de los copos de nieve o de los girasoles.

Para estos casos, el modelo de los vientos interactivos nos da una predicción que cabe comprobar: que una vez que el gas deja el toro, fluye hacia el exterior a una velocidad constante, lo que a su vez produce un desplazamiento Doppler de la luz emitida por el gas. Por desgracia, el modelo no pasó la prueba. En 1999, uno de nosotros (Balick) y Romano Corradi (ahora en el Instituto de Astrofísica de las Islas Canarias) y sus colaboradores estudiaron la nebulosa del Cangrejo del Sur (He2-104) con el Hubble. Encontraron que la velocidad de expansión del gas aumenta proporcionalmente con la distancia a la estrella. El gas más alejado ha llegado así de lejos simplemente porque se mueve más deprisa. Extrapolando hacia atrás en el tiempo, esta nebulosa con forma de reloj de arena debió de formarse en una única erupción estelar, hará unos 5700 años. El modelo de los vientos interactivos, que supone que vientos constantes moldean las nebulosas, estaba, pues, fuera de lugar.

Aún más extraño fue que Corradi y sus colaboradores hallasen que la nebulosa del Cangrejo del Sur es en realidad un par de nebulosas, una dentro de la otra, como las muñecas *matryoshka* rusas. Imaginamos que la nebulosa interior es la más joven de las dos, pero las observaciones demuestran que ambas presentan exactamente la misma pauta de velocidad creciente con la distancia. Por tanto, toda esa compleja estructura tuvo que nacer hará unos seis milenios de un único suceso magníficamente orquestado. Hasta hoy, seguimos perplejos ante este tipo de descubrimientos.

La teoría de los vientos interactivos fue enterrada por fin hace media docena de años. Kwok, Raghvendra Sahai y John Trauger, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, California, Margaret Meixner, de la Universidad de Illinois, y sus colaboradores publicaron una nueva clase de imágenes del Hubble. Mostraban nebulosas planetarias muy jóvenes, cazadas justo antes o poco tiempo después de que la estrella las ionizara y calentara. Confiábamos los astrónomos en que fueran como las variedades maduras, pero en pequeño. Una vez más, nos equivocamos. Las nebulosas planetarias juveniles y embrionarias presentan estructuras mucho más caprichosas. Sus múltiples ejes de simetría no se podían explicar a partir de la sencilla tobera que habíamos supuesto. Tal y como Sahai y Trauger insinuaron en su artículo de 1998 sobre esos objetos, había sonado la hora de encontrar otro paradigma.

Las estrellas compañeras

Hoy día se siguen esbozando teorías que expliquen el aspecto de las nebulosas planetarias. Hay que concebir modelos que abarquen en toda su complejidad desconcertante las observaciones acumuladas. Todos admitimos hoy que uno de los factores principales es la influencia gravitatoria de las estrellas compañeras. Al menos la mitad de las "estrellas" del cielo nocturno son en realidad parejas de estrellas que orbitan una alrededor de la otra. La mayoría de estos sistemas están tan separados, que sus estrellas evolucionan independientemente. Pero en una pequeña fracción de tales binarias, la gravedad de una de las estrellas puede desviar o incluso controlar el flujo de material que expulsa la otra. Esta fracción coincide con el porcentaje de nebulosas planetarias bipolares.

Mario Livio, del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, y Noam Soker, del Instituto de Tecnología Technion de Israel, que fue alumno suyo, abogaron por esta idea muchos años antes de que se pusiera de moda [*véase* "Nebulosas planetarias", por Noam Soker; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1992]. Según su hipótesis, la compañera de la estrella moribunda captura el material que fluye desde ésta. En un sistema donde las órbitas sean menores que la de Mercurio y donde un "año" orbital se mida en días, no será grácil la transferencia. Cuando el material de la estrella moribunda alcance a la compañera, ésta ya se habrá adelantado mucho en su órbita. El material que la fuerza de marea gravitatoria habrá arrancado de la expandida estrella moribunda formará una cola que persiguirá a su compañera estelar, más densa. Esa cola se convertirá con el tiempo en un disco denso y grueso, arremolinado alrededor de la compañera. Posteriores simulaciones demuestran que pueden formar un disco de acreción incluso compañeras con órbitas tan vastas como la de Neptuno.



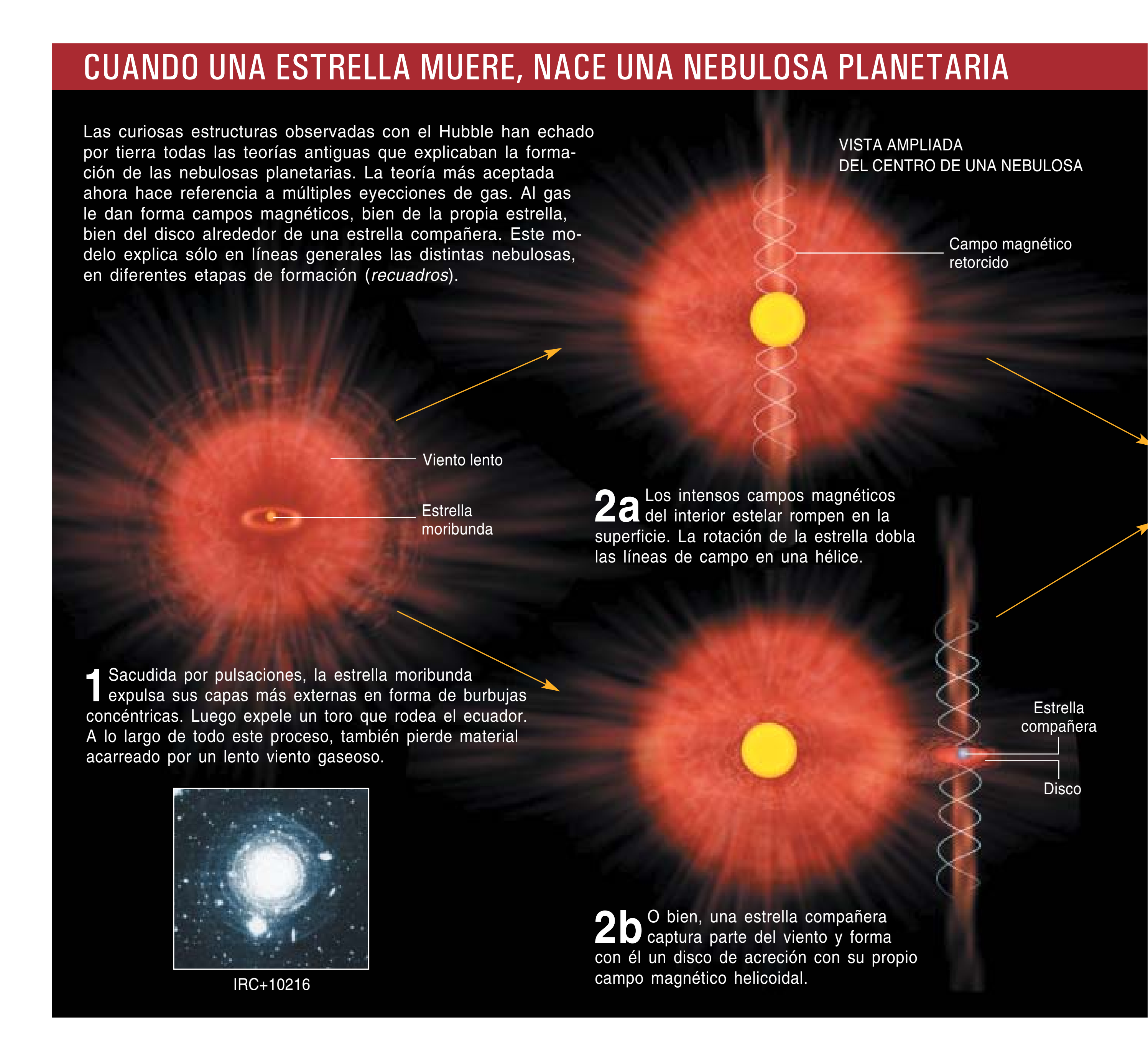
Nebulosa de la Retina (IC 4406)

NASA Y PATRIMONIO DEL HUBBLE (STScI/AURA)

Esta evolución puede conocer un avatar interesante. A medida que la estrella moribunda aumenta su tamaño, quizá llegue a tragarse a su compañera y al disco. Una indigestión cósmica: la estrella compañera y el disco, que entran en el cuerpo de la estrella moribunda describiendo una órbita espiral, la deforman y aplanan desde el interior; las eyecciones de material se proyectan con violencia y generan chorros curvos; poco a poco, la compañera se hunde más y más en el interior de la estrella moribunda hasta que finalmente los dos núcleos se funden, momento en que las eyecciones terminan. Este proceso quizás explique por qué algunas nebulosas parecen el resultado de un flujo de material que acabó abruptamente.

Guiado magnético

Las estrellas compañeras de los sistemas binarios no son las únicas escultoras de las nebulosas planetarias. Intervienen también los intensos campos magnéticos que persisten dentro de la estrella o del disco alrededor de la compañera. Puesto que parte del gas espacial está ionizado, los campos magnéticos guían su movimiento. Los campos fuertes actúan como bandas de

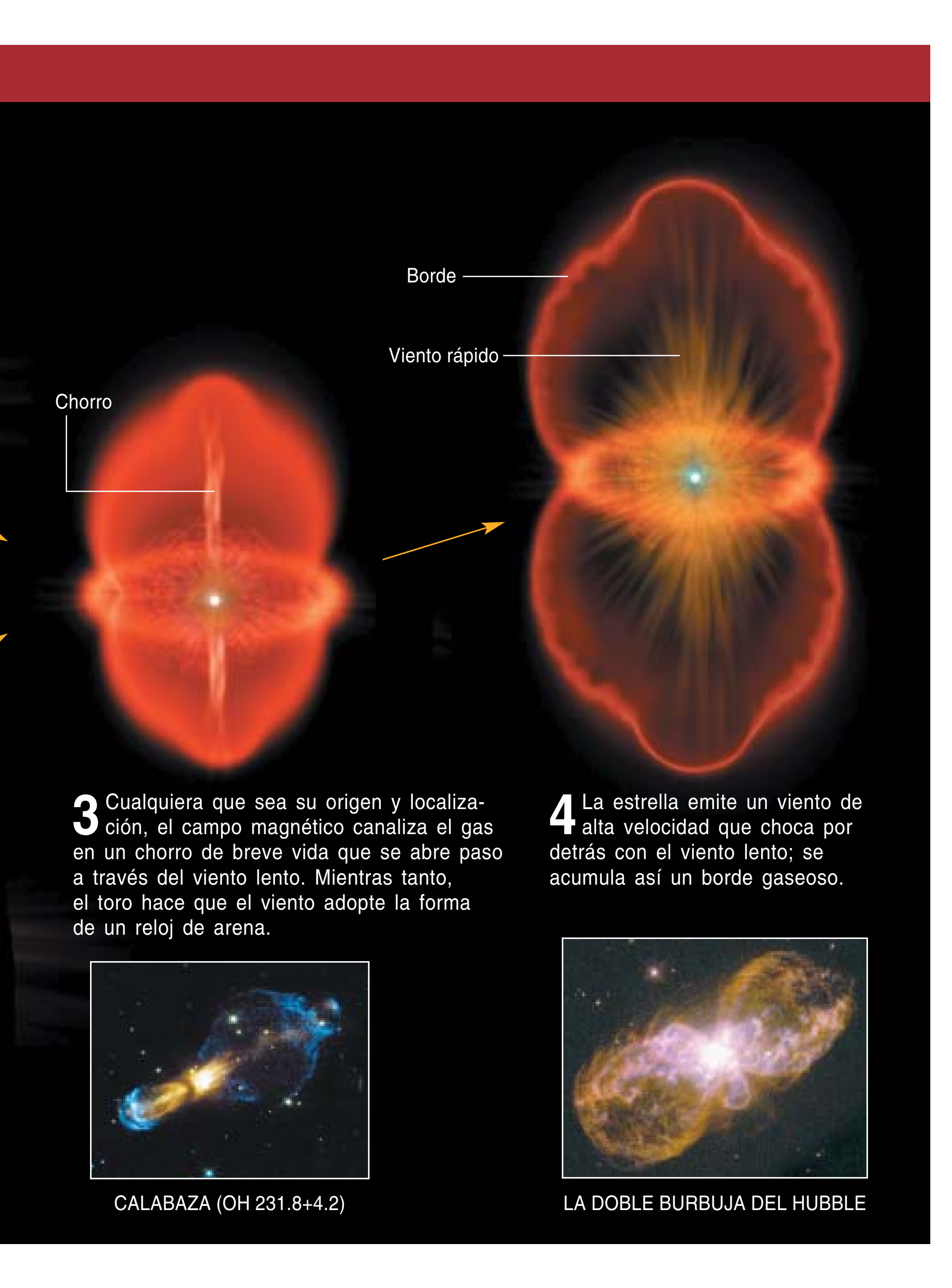


DON DIXON (*ilustraciones*); CORTESIA DE N. MAURON Y P. J. HUGGINS EN *Astronomy and Astrophysics*, VOL. 359; 2000 (*IRC+10216*)

goma rígida que moldean la corriente gaseosa, de igual manera que el campo magnético terrestre atrapa las partículas del viento solar, las conduce hacia las regiones polares y genera así las auroras boreales. A su vez, los intensos vientos estiran, doblan y enredan los campos magnéticos.

A mediados de los años noventa, Roger A. Chevalier y Ding Luo, de la Universidad de Virginia, propusieron que los vientos estelares transportan aros de campos magnéticos. El tira y afloja entre el gas y el campo puede colimar el material expulsado y darle formas singulares. Por desgracia para el modelo, predice que el campo debe comenzar en un estado débil y no desempeña ningún papel en la generación del viento. Esto es un problema, ya que parece que los campos magnéticos activos de las superficies de las estrellas intervienen en que se desencadenen los vientos.

Otra vía es el estudio de los procesos por los que los intensos campos magnéticos arrojan materia al espacio. La convección revuelve el contenido de una estrella moribunda; los campos anclados en el núcleo ascienden con el gas hacia la superficie y, si el interior estelar rota muy deprisa, se enrollan como un muelle. Cuando las líneas de campo rompen en la superficie, se abren y expulsan el material. Procesos similares ocurren en los discos de acreción: tanto la estrella como el disco pueden generar un grupo de vientos distinto. Que sus ejes no se alineen bien podría ser el origen de algunas de las extrañas formas multipolares que se observan en las nebulosas planetarias jóvenes. Junto con Eric G. Blackman, de la Universidad de Rochester, Sean Matt, de la Universidad McMaster, y sus colaboradores, uno de nosotros (Frank) está estudiando estos



3 Cualquiera que sea su origen y localización, el campo magnético canaliza el gas en un chorro de breve vida que se abre paso a través del viento lento. Mientras tanto, el toro hace que el viento adopte la forma de un reloj de arena.

4 La estrella emite un viento de alta velocidad que choca por detrás con el viento lento; se acumula así un borde gaseoso.

CALABAZA (OH 231.8+4.2)

LA DOBLE BURBUJA DEL HUBBLE

NASA/ESA Y V. BUJARRABAL *Observatorio Astronómico Nacional de España (Calabaza)*; B. BALICK, V. ICKE, G. MELLEMA Y WFPC2/HST/NASA *(Doble Burbuja)*

fenómenos. El quid de la cuestión se encuentra en que los campos magnéticos, al igual que las estrellas binarias, proporcionan fuerzas adicionales generadoras de una variedad mucho mayor de estructuras y formas de nebulosas que la ofrecida por el modelo de los vientos interactivos.

Nuestro conocimiento de cómo modelan las estrellas aisladas sus propias nebulosas planetarias ha progresado, pero sigue siendo inmaduro. Hay acuerdo sobre las líneas generales de la muerte estelar. Cuando las estrellas van apagándose, sus reactores nucleares funcionan sin un ritmo constante, a golpes, y expelen las capas exteriores. La teoría de la estructura y evolución estelar es una de las teorías científicas de mayor éxito del siglo XX. Explica con detalle lo que se observa en la mayoría de las estrellas: su brillo, su color, incluso la mayor parte de sus singularidades. No obstante, quedan muchas lagunas, sobre todo muy al principio y al final de la vida de las estrellas.

No lejos de la Universidad de Rochester se encuentra la Escuela de Música Eastman. Allí, compositores e intérpretes buscan vías para expresar su creatividad. Quienes estudiamos la muerte de las estrellas de tipo solar nos encontramos en una situación parecida. Creemos conocer los instrumentos que modulan las imágenes que vemos. Lo que no entendemos es cómo se conciertan para crear esas armonías de las nebulosas planetarias. ¿Qué origina los vientos? ¿Cuándo son importantes las estrellas compañeras? ¿Qué papel desempeñan los campos magnéticos? ¿Qué crea las nebulosas de doble lóbulo?

No somos los únicos astrofísicos intimidados, desconcertados y desafiados por las enigmáticas imágenes obtenidas con el telescopio Hubble y otros instrumentos a lo largo de los últimos quince años. Apenas si habrá campo de la astronomía donde no haya pasado lo mismo. Los datos nuevos acaban por quebrar la mejor de las teorías en cada campo de investigación. Es la naturaleza del progreso. Los descubrimientos son con frecuencia destructivos. Nos obligan a abandonar nuestras viejas cuevas y desbrozan el camino, a veces desorientador, que nos llevará mucho más lejos. Las teorías científicas se construyen para utilizarlas, pero no se debe confiar en ellas: hay que contrastarlas y mejorarlas.

Los autores

Bruce Balick y **Adam Frank** han publicado docenas de artículos, tanto teóricos como observacionales, sobre las nebulosas planetarias y sus estrellas precursoras. Balick es jefe del departamento de astronomía de la Universidad de Washington. Frank es profesor de la Universidad de Rochester.

Bibliografía complementaria

THE SHAPES OF PLANETARY NEBULAE. Bruce Balick en *American Scientist*, vol. 84, n.º 4, págs. 342-351; julio de 1996.

COSMIC BUTTERFLIES: THE COLORFUL MYSTERIES OF PLANETARY NEBULAE. Sun Kwok. Cambridge University Press, 2001.

SHAPES AND SHAPING OF PLANETARY NEBULAE. Bruce Balick y Adam Frank en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 40, págs. 439-486; 2002.

Control genético del desarrollo del ojo

Hay en el reino animal una amplia diversidad de tipos de ojos, cuyo desarrollo inicial se halla controlado por un circuito genético que ha persistido en el curso de la evolución. Pese a ese origen común, los ojos han ido adquiriendo, de forma independiente en cada línea filogenética, características distintivas

Emili Saló

Cuando aparecieron en la Tierra las primeras formas de vida, hace unos 3500 millones de años, el Sol brillaba con la intensidad y cadencia de nuestros días. Los primeros organismos, unicelulares, empezaron a desarrollar fotopigmentos sensibles a los fotones. A partir de esas macromoléculas forjaron estructuras que les permitieron reaccionar frente a la luz. Con los organismos pluricelulares aparecieron los ojos, entendidos como órganos especializados que miden la intensidad y dirección de la luz. En el curso de su evolución han ido conformando tipos muy diversos, que van desde las manchas oculares de los Platelmintos hasta el preciso ojo de cámara de las águilas.

Dos son los elementos fundamentales del ojo: una célula fotorreceptora, que contiene en sus membranas un fotopigmento sensible a los fotones, y una célula pigmentaria, que protege a la anterior de un exceso de luz y permite, a su vez, establecer una direccionalidad de la radiación lumínica.

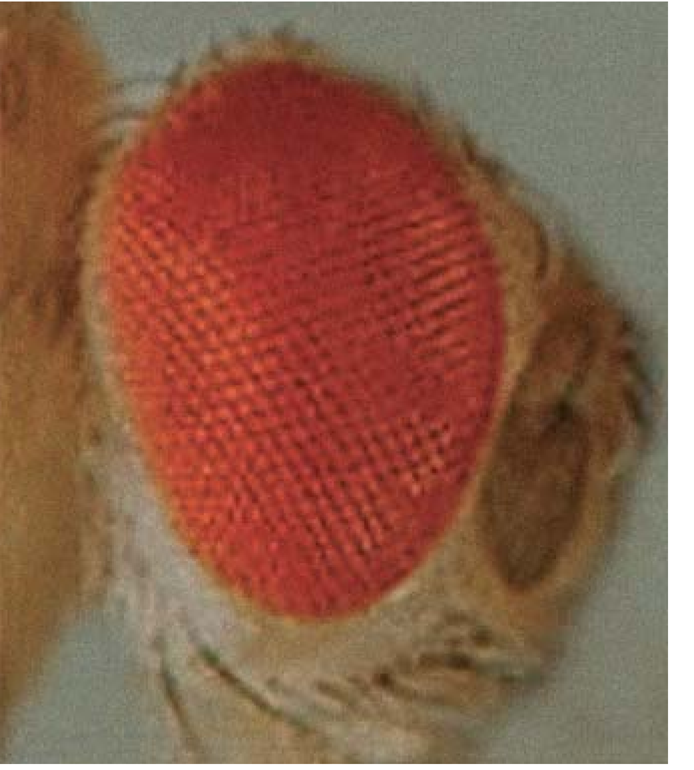
Los fotopigmentos están formados por opsina, proteína con siete dominios de transmembrana que encierran en su interior un cromóforo, el retinol; esta molécula derivada de la vitamina A modifica, en función de la recepción de fotones, la configuración *cis/trans* de sus enlaces entre carbonos. Las células fotorreceptoras han desarrollado dos tipos de especializaciones para acumular fotopigmento en sus membranas: los fotorreceptores ciliares han adaptado un cilio; los fotorreceptores rabdoméricos, unas invaginaciones microvilloides, el rabdómero.

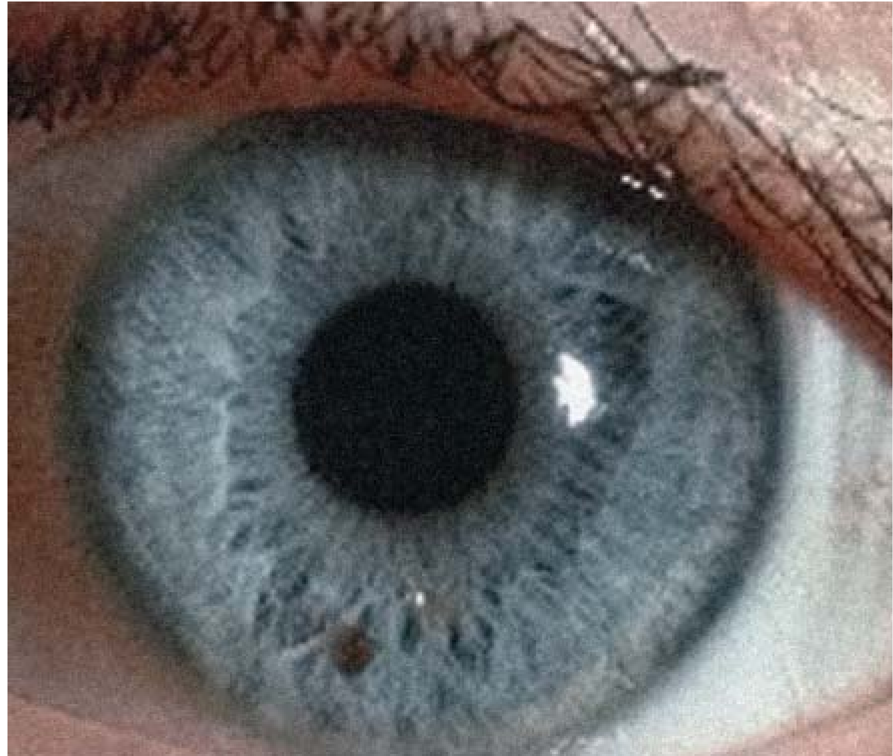
Las células fotorreceptoras y las células pigmentarias se han ensamblado en dos patrones básicos, a saber, los ojos de cámara y los ojos compuestos (*figura 1*). En los primeros, característicos de vertebrados y cefalópodos, las células fotorreceptoras se agrupan, protegidas por las células pigmentarias, en una cámara común. En los ojos compuestos, propios de ciertos invertebrados, la unidad básica es el ojo simple u omatidio, formado por un reducido número de los dos tipos celulares. La agregación de varios omatidios genera un ojo compuesto.

Además de estos dos modelos básicos de organización ha surgido una amplia diversidad de ojos, en razón de su distinto aprovechamiento de las propiedades ópticas de la sombra, la refracción y la reflexión. Entre invertebrados encontramos, por ejemplo, manchas oculares, ojos compuestos, ojos con cristalino, espejos y una serie de mecanismos de visualización (córneas, lentes con enfoque y ojos compuestos con cristalino o espejos coordinados).

La historia empieza en Darwin

Explicar la evolución de un órgano del refinamiento del ojo constituye un reto formidable para el biólogo del desarrollo. El propio Charles Darwin la abordó en su *Origen de las especies*. Proponía que, a partir de un ojo simple ancestral, prototípico, se habrían generado gradualmente, por variación (mutación) y selección natural, los ojos de visión perfecta que ajustan el foco a diferentes distancias, que admiten distintas cantidades de luz y que corrigen las aberraciones esféri-

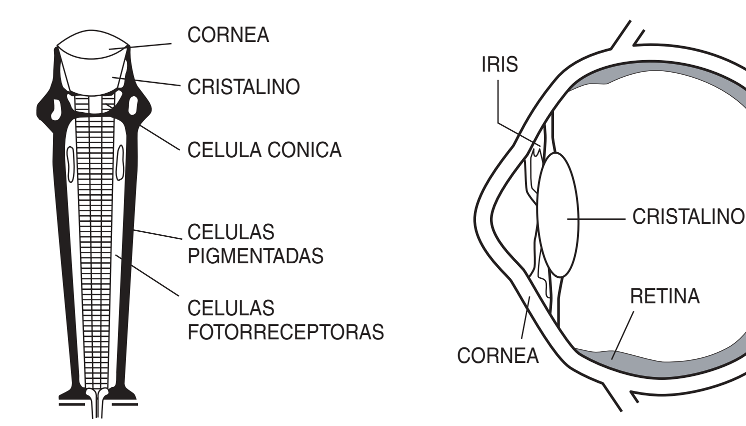




cas y cromáticas. Supuso que ese ojo prototípico constaría de una sola célula fotorreceptora y una célula pigmentaria; ésta protegería parcialmente de la luz a la fotorreceptora para dar direccionalidad y ambas se hallarían bajo una epidermis transparente.

Los ojos primitivos de que hablaba Darwin pueden encontrarse en algunas especies de planaria (Platelmintos). Admitido ello, quedaría, sin embargo, por explicar el origen de este ojo prototipo, asunto del que nos ocuparemos más adelante.

A partir de estudios anatómicos y ultraestructurales de varios tipos de ojos y células fotorreceptoras, Salvini-Plawen y Ernst Mayr postularon, en 1961, que estos órganos se habían originado, en el curso de la evolución y por vías independientes, al menos entre 40 y 65 veces. Resulta manifiesto un origen independiente, si comparamos el ojo compuesto de un insecto con el ojo de cámara humano. Pero los autores defendían incluso un origen independiente para los distintos tipos de ojos observados en moluscos bivalvos: el de cámara con una sola lente o cristalino de *Cardium*, el ojo con espejo de *Pecten* y el ojo compuesto de *Arca*. Los ojos compuestos de artrópodos y de *Arca* son muy similares, pero los del bivalvo poseen una sola célula fotorreceptora por omatidio, mientras que los insectos y crustáceos tienen entre ocho y nueve por unidad. Por ello, Salvini-Plawen y Mayr interpretaban el ojo compuesto de *Arca* como de una formación *ex novo*.



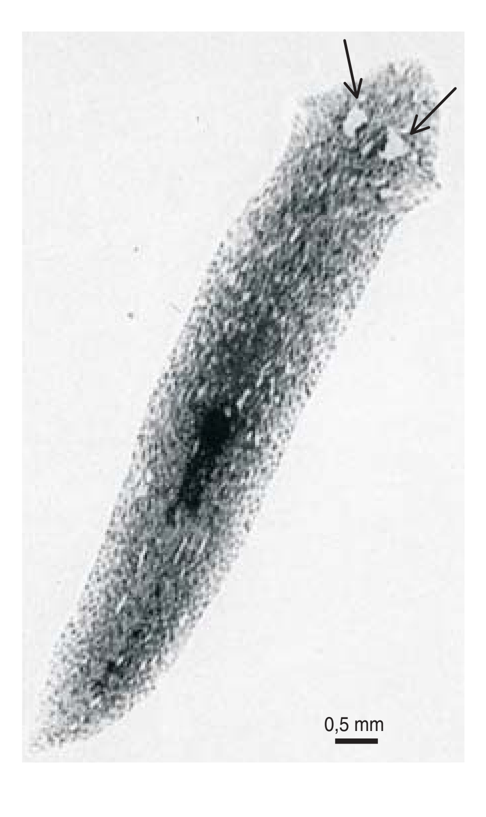
1. OJOS COMPUESTOS Y DE CAMARA. En la cabeza de *Drosophila* resalta su ojo compuesto (*arriba, izquierda*), que consta de 800 omatidios o facetas. En un omatidio, la célula cónica tendría la función del iris humano; las células pigmentarias estarían situadas en el exterior, protegiendo del exceso de luz a las células fotorreceptoras alojadas en el centro. A través de la córnea transparente del ojo humano (*arriba, derecha*) podemos observar el iris que protege del exceso de luz y, en el centro, la pupila, que cambia de tamaño por retracción del iris según la intensidad de luz. El cristalino modifica su curvatura para enfocar la imagen deseada. El esquema inferior expone una sección con los principales componentes.

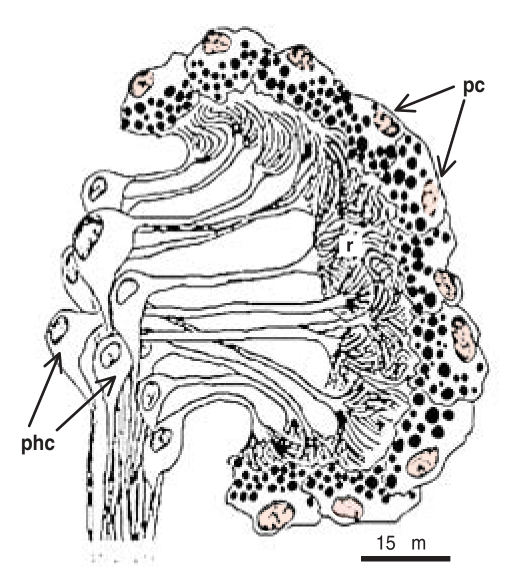


Contra esa hipótesis se objetaba la aparición de las distintas formas basales de ojos en un solo grupo de bivalvos, así como la presencia del mismo fotopigmento, la opsina, en todos los ojos de metazoos. Esa realidad avalaba el modelo de un origen monofilético de los ojos. La controversia se avivó a raíz de la investigación del circuito genético que controla el desarrollo de los ojos de los metazoos.

El control genético del desarrollo del ojo

En 1915 Hoge caracterizó, en el cromosoma IV de *Drosophila melanogaster*, un mutante que producía un fenotipo variable de pérdida parcial o total del número de facetas u omatidios de sus ojos compuestos; se trataba del mutante *eyeless*





2. ESTRUCTURA DEL OJO DE PLANARIA (*derecha*), platelminto de vida libre del que se ofrece una fotografía dorsal (*izquierda*). El animal se mueve arrastrado por cilios ventrales. Las flechas indican la posición anterior dorsal de dos zonas despigmentadas de la epidermis: manchas periglobulares. En la parte interna de estas manchas periglobulares residen los ojos simples de planaria, las manchas oculares. Esos ojos simples constan de dos tipos celulares, las células pigmentarias (*pc*) y las células fotorreceptoras (*phc*). Las células pigmentarias acumulan en su citoplasma gránulos de pigmento para filtrar la luz; se agrupan formando una cavidad, donde se acumulan las regiones rabdoméricas (*r*) de las células fotorreceptoras que contienen los fotopigmentos sensibles a la luz u opsinas. El cuerpo celular de las células fotorreceptoras se encuentra fuera de la cavidad ocular; sus prolongaciones axonales se conectan con los dos ganglios cefálicos (no mostrado).

EMILI SALO

(*ey*). Más tarde, se aisló, en el ratón, la mutación *small eye*; y en humanos, se describió el síndrome mutante *aniridia*. Los embriones homocigotos para el alelo *small eye* no presentan ojos ni nariz, su cerebro se halla gravemente dañado y mueren, pues, prematuros; en cambio, los heterocigotos, aunque presentan ojos reducidos son viables. Los pacientes heterocigotos para el alelo *aniridia* desarrollan un fenotipo similar con reducción o ausencia del iris (*figura 3*).

El análisis molecular de los genes homeóticos de *Drosophila* permitió aislar los primeros genes mayores del desarrollo, es decir, aquellos que ocupan una posición jerárquica superior en la red de interacciones génicas que conduce a la morfogénesis de un eje corporal o de un órgano. Los genes homeóticos, responsables de la diversificación del eje anteroposterior, comparten una caja "hox". En la proteína codificada hallamos una sección o dominio, cuya secuencia aminoacídica ha persistido ("se ha conservado", si usáramos el barbarismo) en el curso de la evolución y confieren capacidad de interacción con el ADN. Estas proteínas homeóticas son factores de transcripción; regulan, pues, la expresión de otros genes a través de una red jerárquica y, por lo tanto, precisan dominios de interacción con el ADN.

Andando el tiempo, se caracterizaron otras cajas persistentes ("conservadas") en genes reguladores de la segmentación de *Drosophila*. Aludimos a las cajas "paired", que se han mantenido en distintos filos animales y que confieren también capacidad de unión al ADN. Otras proteínas reguladoras del desarrollo presentaban distintas combinaciones de cajas "hox" y "paired" y se denominaron proteínas "Pax". En los vertebrados, las proteínas "Pax" se agrupan, en función de la semejanza de secuencias, en cuatro grandes familias. En una de ellas se encuentra el gen *Pax6*.

El gen *Pax6*

El primer gen *Pax6* fue clonado en ratón el año 1991 por C. Walter y P. Gruss, en el Instituto Max Planck de Química Biofísica de Gottingen. Por sonda emplearon la secuencia de la caja "paired" del gen de segmentación *paired* de *Drosophila*. Muy pronto se confirmó que este gen *Pax6* correspondía al gen afectado por la mutación *small eye*. En 1993 también, C. C. Ton, de la Universidad de Texas, clonó el gen *aniridia* humano. Cifraba una proteína muy similar, en la secuencia de aminoácidos, a la codificada por el gen del ratón. De ello se infería una fuerte presión selectiva sobre esta proteína.

La investigación comparada había hallado semejanzas entre las secuencias de los genes *Pax* de vertebrados y de *Drosophila*. En 1994, Rebecca Quiring, del laboratorio de Walter Gehring en la Universidad de Basilea, clonó el gen *Pax6* de *Drosophila*. Obtuvo un resultado inesperado: la mutación de este gen determinaba un fenotipo *eyeless* igual al descubierto por Hoge en 1915. Este gen *Pax6* se cartografió en la región 102D del cromosoma IV, donde se incluía el locus *ey*. En dos mutaciones espontáneas ey^2 y ey^R, los genes clonados presentaban la inserción de un transposón en distintas regiones del gen *Pax6*; aparecía afectada su expresión en el primordio del ojo embrionario y en el disco imaginal del ojo del estadio larvario. Esas observaciones indicaban que el gen *Pax6* era el responsable de la mutación *eyeless*. Por último, la comparación de secuencias de aminoácidos entre las cajas "Paired" y "Hox" de vertebrados y *Drosophila* mostró un grado notable de persistencia a través de la evolución; se mantenía también la posición de varios intrones. Se

trataba, en resumen, de genes ortólogos (origen común).

Todo apuntaba a que *Pax6* constituía un gen mayor del desarrollo de los ojos. Tesis antagónica de la que defendía un origen independiente de los distintos tipos de ojos. La idea recibió ulterior confirmación con la caracterización de genes ortólogos de *Pax6* en vertebrados, tunicados, equinodermos, artrópodos, nematodos, nemertinos, moluscos, anélidos y platelmintos.

Así, Georg Halder y Patrick Callaerts, del laboratorio de Gehring, construyeron un mutante de ganancia de función dirigiendo la expresión de *Pax6* mediante el sistema "gal4-UAS". (Se trata de un método que produce organismos transgénicos que expresan genes en nuevas regiones de acuerdo con los promotores que se integren.) La expresión de *Pax6* en distintos discos imaginales produjo en alguno de ellos (antena, pata y ala) la aparición de ojos compuestos ectópicos, es decir, ojos adicionales en nuevas regiones del cuerpo (*figura 4*).

A partir de este momento, el gen *Pax6* se consideró paradigma de gen mayor del desarrollo. Su expresión en determinados tejidos desencadena una cascada de activación de varios miles de genes que promueven la formación del ojo. Si atendemos a su histología, estos ojos ectópicos son normales y reaccionan al estímulo luminoso, aunque no transmiten la señal al cerebro, pues carecen de las conexiones adecuadas. Sólo con los ojos ectópicos situados en las antenas se transmite la señal al cerebro, si bien ésta corresponde a la de la activación de los quimiorreceptores que se encuentran en la antena. Podríamos decir, pues, que esta mosca transgénica es capaz de *oler la luz*.

Más tarde, se analizó si estos genes pueden sustituirse funcionalmente entre especies. Para ello se sobreexpresaron en *Drosophila* los genes *Pax6* ortólogos de ratón o de molusco. Y se consiguió el mismo fenotipo de ojos compuestos de *Drosophila* ectópicos. El experimento recíproco se ha logrado parcialmente en el anfibio *Xenopus*, donde el gen *Pax6* de *Drosophila* sobreexpresado produce cristalinos oculares ectópicos.

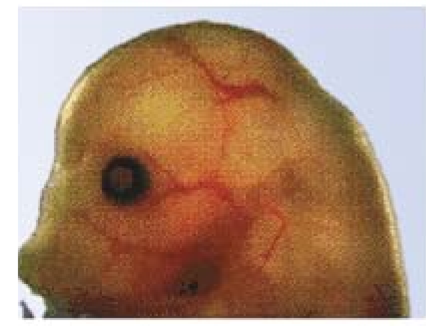
Estos resultados respaldan la tesis de una misma senda genética ancestral en la formación de los ojos. (Si bien, y dado que los factores de transcripción suelen tener capacidad autoactivadora, no se puede descartar que estos genes *Pax6* interespecíficos desencadenen la cascada genética transactivando el gen *Pax6* endógeno del huésped.)

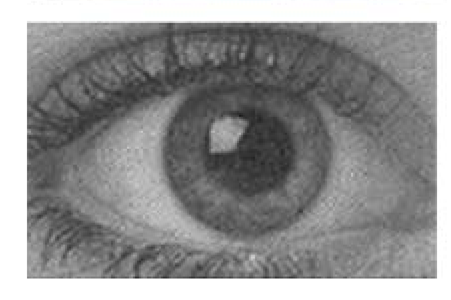
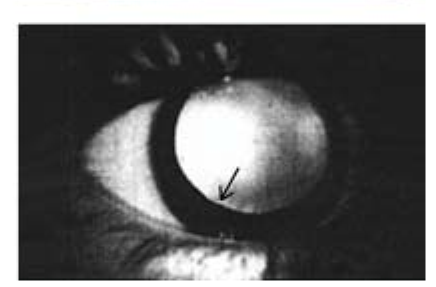
El gen *toy*

Posteriormente se descubrió un segundo gen *Pax6*. Apareció en una duplicación de la línea de los insectos holometábolos. Este segundo gen, denominado *twin of eyeless (toy)*, regula al gen *ey* en la fase embrionaria; lo hace mediante el control directo del potenciador ("enhancer") de *ey* en el desarrollo del ojo compuesto. También se ha observado que ambos genes cumplen una función equivalente y pueden sustituirse parcialmente, aunque *toy* se requiere para inducir la formación de los ojos simples que existen en la parte dorsal de la cabeza y *ey* interviene en la morfogénesis del ojo compuesto.

Si bien no hay duda sobre el papel central de *Pax6* en el desarrollo de los ojos, su expresión es condición necesaria pero no suficiente para tal misión. Así, observamos que *Pax6* se expresa también en tejidos no ópticos, como el sistema nervioso central o en la nariz de





EMILI SALO

3. FENOTIPOS NORMALES Y MUTANTES PARA EL GEN *Pax6.* En la columna izquierda se presentan, de arriba abajo, los ojos normales de *Drosophila* adulta, embrión de ratón y adulto humano. En la columna derecha se detallan los fenotipos mutantes del mismo gen *Pax6*, con una reducción importante del número de omatidios para el mutante *eyeless* de *Drosophila*, ausencia de ojos para el mutante *small eye* en embrión de ratón y ausencia de iris (*flecha*) en el síndrome mutante aniridia.




4. INDUCCION DE OJOS ECTOPICOS EN *DROSOPHILA* mediante la expresión dirigida de los genes *eyeless* (*ey*, *izquierda*) y *twin of eyeless* (*toy*, *derecha*). En ambos casos, además del ojo compuesto normal de la cabeza, se aprecian ojos ectópicos en cada una de las tres patas y en las alas.



vertebrados. Además, *Pax6* debe actuar en coordinación con otros genes para especificar el desarrollo óptico. Se comprueba, por ejemplo, en la inducción de ojos ectópicos, que sólo se da en los discos imaginales que expresan un factor de crecimiento del tipo TGF-B determinado por el gen *decapentaplegic* (*dpp*). Dado que *ey* y *dpp* no se regulan entre sí, se supone que actúan de manera sinérgica en la inducción del desarrollo óptico.

Otros genes

Pax6 no es el único gen capaz de producir ojos ectópicos. Poseen esa facultad otros genes capaces cuando se sobreexpresan; entre ellos, *sine oculis* (*so*), *eyes absent* (*eya*) y *dachshund* (*dac*). Ciertas mutaciones de los mismos producen defectos en el desarrollo del ojo. *Eya* y *dac* son inductores débiles de morfogénesis de ojos ectópicos cuando se sobreexpresan en territorios no oculares. Lo mismo que en el caso de *ey*, la inducción se intensifica cuando se coexpresa el gen *dpp*. Si los genes sobreexpresados son *eya* y *so*, asistimos a una inducción más vigorosa de ojos ectópicos. La proteína codificada por *so* corresponde a un factor de transcripción con dominio homeótico y un segundo dominio exclusivo de las proteínas "sine oculis" denominado dominio "so", mientras que la proteína codificada por *eya* corresponde a un nuevo tipo de fosfatasa tirosina, que se aloja en el núcleo e interacciona con el factor de transcripción so.

Por análisis epistáticos sabemos que *toy, ey* y *dpp* actúan curso arriba ("upstream") de *so, eya* y *dac*. En el caso de *so* hay pruebas sólidas de que *ey* y *toy* regulan transcripcionalmente a *so* a través de un potenciador específico de ojo que se encuentra en el intrón largo de *so*. Por su parte, *dac* opera curso abajo ("downstream") del heterodímero *so-eya*. La inducción de ojos ectópicos por la sobreexpresión de *so, eya* y *dac* promueve la expresión de *ey*, pero no la de *toy*. Paralelamente, la proteína "eya" se requiere para mantener la expresión del factor de crecimiento dpp en el disco imaginal de ojo.

También se pueden producir ojos ectópicos mediante la sobreexpresión de *optix*, otro gen *sine oculis* de *Drosophila*, que corresponde a una familia distinta, la *six-3*. En este caso, los ojos ectópicos pueden originarse en un fondo mutante de *ey*, aunque no se ha estudiado sin la presencia de *toy*.

Existe, en definitiva, una red de interacción génica iniciada por los genes *Pax6* y *dpp* que regulan al complejo de genes *so-eya*, que, a su vez, regulan a *dac*. Se dan también regulaciones de los genes inducidos sobre los inductores y otros genes que, como *optix*, actúan independientemente de los anteriores. Todo ello permite iniciar la especificación del ojo (*figura 5*).

Por último, se han caracterizado otros genes de la familia *Pax6* en *Drosophila*. Se trata de *eyegone* (*eyg*) y su duplicado *twin of eye gone* (*toe*), ambos ubicados en el cromosoma III; su mutación determina un fenotipo de ausencia de ojo. A diferencia de sus homólogos, éstos contienen el dominio "paired" truncado, con pérdida de la región N-terminal, aunque mantienen la capacidad de unión al ADN por la región C-terminal del dominio "paired" así como por el homeodominio intacto. Recientemente, María Domínguez, de la Universidad Miguel Hernández de Alicante, ha demostrado que *eyg* es activado en el comienzo del desarrollo del ojo por la vía de "Notch" (proteína señalizadora) y que es responsable del control del crecimiento de las células precursoras de los ojos.

Por lo tanto, en *Drosophila,* observamos dos vías distintas para el control del crecimiento y especificación del ojo, a través de los genes *eyg/toe* y *ey/toy,* respectivamente; ambas, enmarcadas en un modelo genético donde una compleja red de genes es responsable de coordinar el desarrollo inicial de la inducción de ojos (*figura 5*).

Conservación de la red génica de determinación de los ojos

La conservación evolutiva del gen *Pax6* sugirió la existencia de mecanismos funcionales que persistían en la oculogénesis animal. A favor de esta hipótesis se contaba con resultados que demostraban que tanto el gen *Pax6* de *Drosophila* como el de ratón inducían ojos ectópicos cuando se sobreexpresaban en los discos imaginales de larvas de la mosca o en embriones de *Xenopus*.

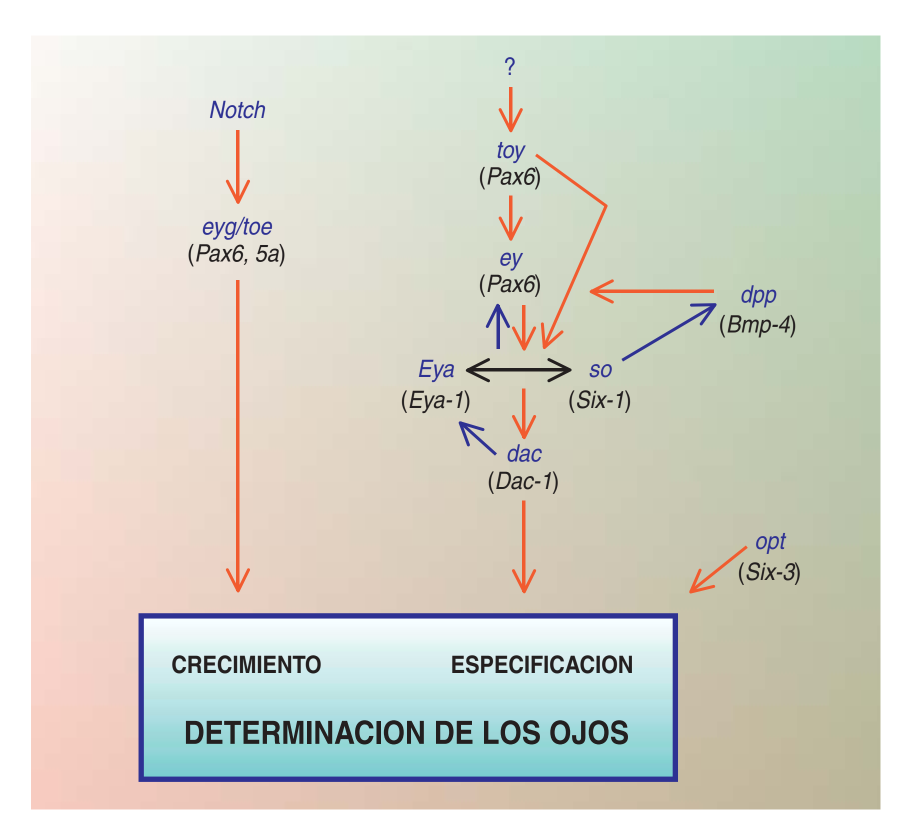
Ante esta manifiesta persistencia funcional, la forma más rápida de caracterizar genes de vertebrados relacionados con ese entramado gené-

tico era seguir la vía definida en *Drosophila*. Por ese método se fueron caracterizando, en vertebrados, los genes *dac*, *eya* y *so*. Se aislaron cuatro genes *eya* en ratón. En un fondo mutante de *Pax6* la expresión de los genes *eya* disminuía en los ojos y el ectodermo nasal. En humanos se caracterizó el gen *EYA1* cuya haploinsuficiencia provocaba el síndrome branquio-oto-renal (BOR).

Hay muchos más ejemplos. Se han descrito seis genes *sine oculis* en ratón; varios de ellos se expresan durante el desarrollo de la retina y *six-3* durante la invaginación de la vesícula del cristalino. En el pez teleósteo *Medaka*, la expresión ectópica del gen *six3* de ratón induce el desarrollo de cristalinos y retina ectópicos. Por su parte, las mutaciones del gen humano *SIX3* generan holoprosencefalia y microftalmía; asimismo, el gen *Optix2*, de la familia *sine oculis*, está relacionado con el desarrollo de la retina y deleciones del gen *OPTIX2* humano producen anoftalmía bilateral. Dos homólogos del gen *dac*, de *Drosophila,* se han clonado en vertebrados y se encuentran involucrados en el desarrollo inicial de la retina. Los genes *Otx* y *Crx* comparten homología con genes de *Drosophila* y están también implicados en la determinación del ojo de ambas especies.

Observamos, pues, una notable persistencia funcional de esta red génica de determinación de las estructuras oculares lo mismo en *Drosophila* que en los vertebrados. Pero no faltan excepciones. Así, el gen *Rax* de vertebrados, cuya función es imprescindible en el desarrollo de los ojos y del cerebro anterior, mientras que el ortólogo de *Drosophila* se expresa en el cerebro anterior pero no en el ojo (*tabla*).

La existencia en vertebrados de un gran número de representantes de estas familias de genes de la red inicial de la determinación de los ojos muestra una estrategia evolutiva clásica de duplicación génica y adquisición de nuevas funciones. Hay miembros de esta red génica (o "casette" duplicado) que se han especializado en la determinación de otros sensores, órganos, tejidos o estructuras. Ciertas mutaciones de



5. RED GENICA REGULADORA de la determinación inicial del ojo de *Drosophila*. Indicamos en azul los genes de Drosophila: *eyeless* (*ey*), *twin of eyeless* (*toy*), *sine oculis (so)*, *eye absent (eya)*, *dachsund (dac)*, *optix (opt)*, *decapentaplegic (dpp)*, *Notch*, *eye gone (eyg)* y *twin of eye gone (toe).* En negro y paréntesis se muestran los nombres de los genes ortólogos en vertebrados. Las flechas rojas significan inducción, mientras que las azules señalan retrorregulación (regulación "feedback"); la doble flecha negra indica interacción entre los dos productos génicos.

EMILI SALO

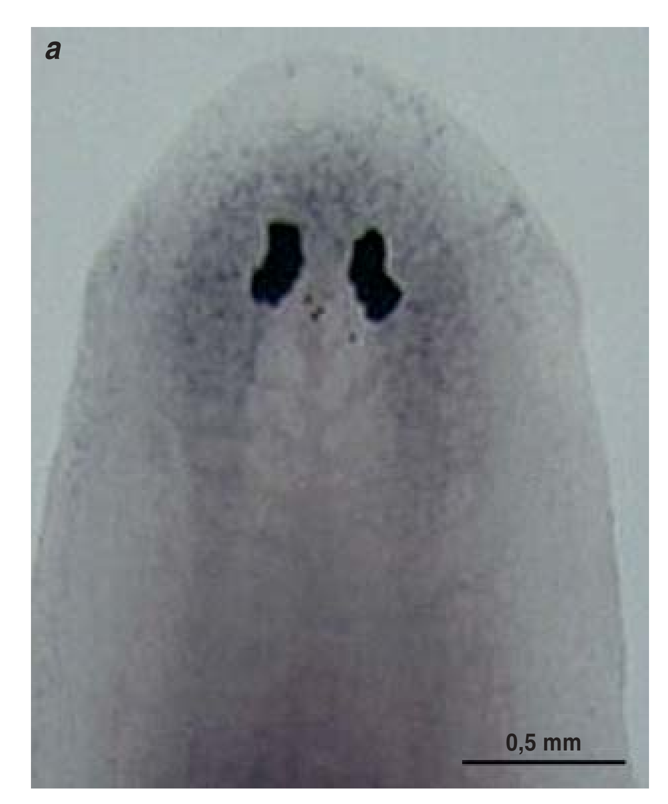
miembros de estas familias, como *Pax3, Eya2, Six1* y *Dach2*, generan defectos en otras estructuras craneofaciales, glándula pituitaria, riñón y tejido muscular.

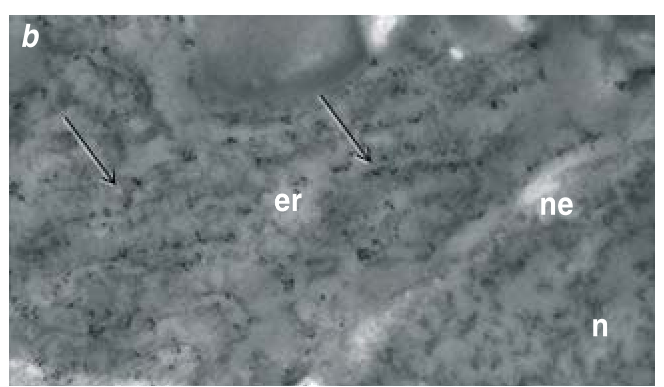
Además de su investigación en vertebrados, el gen *Pax6* se ha venido caracterizando de forma paralela en invertebrados: ascidias, erizo de mar, anfioxo, cefalópodos, nematodos, nemertinos y anélidos. De nuevo la comparación de secuencias revela una notoria semejanza en los dominios de unión al ADN, así como en su función.

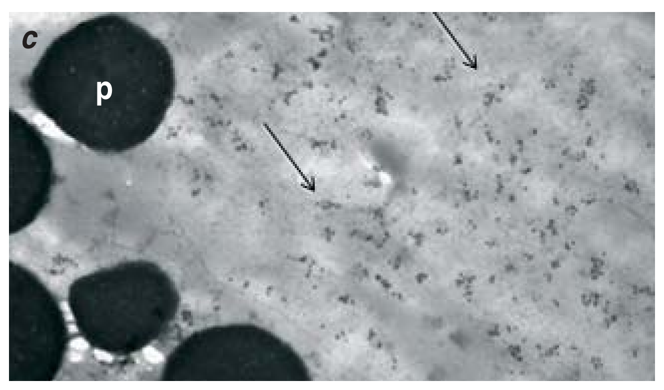
Genes ópticos de las planarias

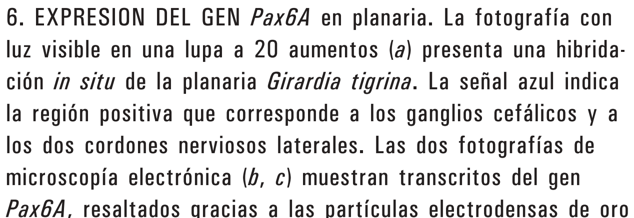
Los Platelmintos presentan un ojo muy simple, parecido al ojo prototípico sugerido por Darwin. Durante mi estancia postdoctoral en el Biozentrum de Basilea, Gehring me propuso caracterizar estos genes en el genoma de *Girardia tigrina*, planaria de agua dulce. Las planarias son organismos de vida libre que gozan de una extrema plasticidad morfológica, gracias a la cual crecen y decrecen continuamente en función de la ingesta. También pueden, a partir de cualquier fragmento, regenerar un organismo entero en poco menos de dos semanas. Tan notable plasticidad se debe a la presencia, en la forma adulta, de neoblastos, células totipotentes con capacidad proliferativa, equivalentes a las células madre. Podemos, pues, estudiar el proceso de regeneración de los ojos con el simple uso de una cuchilla, que seccione la cabeza de un ejemplar; al cabo de unos siete días, observaremos la aparición de nuevos ojos.

Los ojos de planaria, situados dorsalmente encima del cerebro, están formados por dos tipos celulares: las células nerviosas fotorreceptoras y las células pigmentarias. Las primeras presentan estructuras rabdoméricas, donde acumulan el fotopigmento opsina, y prolongacio-









6. EXPRESION DEL GEN *Pax6A* en planaria. La fotografía con luz visible en una lupa a 20 aumentos (*a*) presenta una hibridación *in situ* de la planaria *Girardia tigrina*. La señal azul indica la región positiva que corresponde a los ganglios cefálicos y a los dos cordones nerviosos laterales. Las dos fotografías de microscopía electrónica (*b*, *c*) muestran transcritos del gen *Pax6A*, resaltados gracias a las partículas electrodensas de oro coloidal unidas al ARN antisentido que ha hibridado en la sección del tejido. El primer caso (*b*) corresponde al cuerpo celular de una célula fotorreceptora; el segundo (*c*) pertenece a una célula pigmentaria. Las flechas, en ambas fotografías, señalan la presencia de partículas de oro coloidal. Membrana nuclear (*ne*); núcleo (*n*); retículo endoplasmático (*er*); vacuolas de pigmento (*p*).



nes axonales que establecen conexión con los ganglios cefálicos. Las células pigmentarias forman una estructura de copa invertida, que rodea a los rabdómeros en todas las direcciones, salvo en una, por donde entra la luz.

Durante la regeneración, las células precursoras de los ojos se determinan a partir de los neoblastos. Una vez instaladas en el territorio potencial de ojo, estas células precursoras se dividen y diferencian en los dos tipos celulares, que se mantienen agregados; la fusión de varias de estas unidades genera la mancha ocular, que contiene entre 30 y 35 células rabdoméricas y otras tantas pigmentarias. Siguiendo el método clásico de clonación por similitud mediante oligonucleótidos degenerados y aplicando la técnica de reacción en cadena de la polimerasa, amplificamos dos genes *Pax6*.

En investigación paralela, el grupo de Renata Batistoni y el de Vittorio Gremigni, de la Universidad de Pisa, obtuvieron los mismos resultados con el genoma de otra especie de planaria, *Dugesia japonica*.

Del estudio comparado de las secuencias obtenidas se desprende que se trata de una duplicación exclusiva en el clado Platelmintos. Estos genes se denominaron *Pax6A* y *Pax6B*; ambos genes se expresan en el sistema nervioso central, incluidos los ganglios cefálicos y los dos cordones nerviosos (*figura 6*), así como en los dos tipos celulares oculares.

Posteriormente, en nuestro laboratorio de la Universidad de Barcelona, clonamos dos genes distintos de la familia *sine oculis*, ortólogos a los de la subfamilia *six1* y *six3*. Mientras que el primero se expresaba exclusivamente en las células fotorreceptoras, el segundo, a diferencia de lo que ocurre en vertebrados y *Drosophila*, no se expresaba en los ojos de planarias sino en las ramas nerviosas que conectan los ganglios cefálicos con los distintos sensores de la cabeza (*figura 7*).

Por último, el grupo de Batistoni clonó el ortólogo de *eyes absent* (*eya*), que, además de expresarse en la periferia de los ganglios cefálicos y a lo largo del parénquima, lo hacía también en las células fotorreceptoras. Tanto *six1* como *eya* se expresan en el blastema de regeneración antes de que se diferencien los ojos. Su expresión precoz marca el territorio potencial del ojo en el blastema indiferenciado de regeneración.

Los ensayos funcionales realizados en nuestro laboratorio, mediante la inyección de ARN de doble cadena, que genera un bloqueo en la expresión normal del gen que codifica, han producido los primeros fenotipos sin ojos en Platelmintos. Lo conseguimos al bloquear la acción del gen *six1* (*figura 8*). Más

tarde, el grupo de Batistoni obtuvo el mismo fenotipo al interferir la función del gen *eya*.

Recientemente, hemos logrado los primeros organismos transgénicos recurriendo a vectores versátiles, basados en los transposones promiscuos *mariner, Hermes* y *piggyBac* y un gen marcador de proteína fluorescente verde (EGFP, acrónimo de "Enhanced Green Fluorescent Protein"). Esa proteína está regulada por un promotor artificial que presenta tres regiones en tándem del promotor del gen de la opsina. Ocurre que dicha región promotora es reconocida por la proteína Pax6 de invertebrados muy dispares. En planarias transgénicas, por ejemplo, el marcador en cuestión se expresa en los ojos (*figura 9*); lo que nos revela la presencia de proteína Pax6, u otra proteína con funciones similares, durante la regeneración y en los ojos adultos de planarias.

Los resultados obtenidos nos revelan, pues, que los ojos simples de Platelmintos poseen también el circuito básico ancestral que se ha identificado en todos los organismos bilaterales estudiados hasta el momento. Sólo se apreció una variación en el comportamiento del circuito genético: la inhibición mediante ARN de doble cadena de los dos genes *Pax6* no impedía la regeneración de los ojos. Nos encontramos, así, ante un fenómeno paradójico: uno de los ojos más parecidos a los ojos prototípicos no requiere de *Pax6* para su determinación. Este comportamiento se ha observado también en el desarrollo de ojos de anélidos adultos y en las células fotorreceptoras de anfioxo, ejemplos de variaciones en el comportamiento del circuito ancestral al sustituirse la función del gen *Pax6* por otros genes de la red.

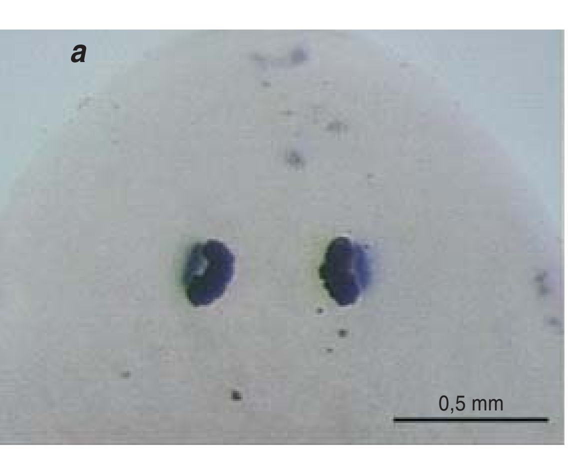
Cnidarios

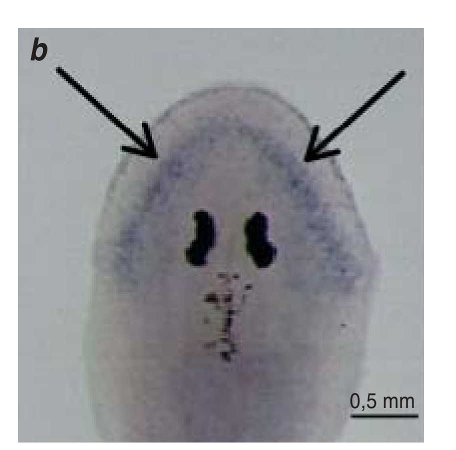
Descendiendo en la escala filogenética nos encontramos con los Cnidarios, algunas de cuyas especies presentan ojos completos con cristalino. No se ha aislado en ellas ningún gen *Pax6*. Recientemente, Zbynek Kozmiz y colaboradores, del Instituto Nacional del Ojo de Bethesda, han caracterizado el gen *PaxB* en *Tripedalia cystophora*. Según su informe, esa cubomedusa posee características estructurales y funcionales de los genes *Pax6* y *Pax2* de los organismos bilaterales.

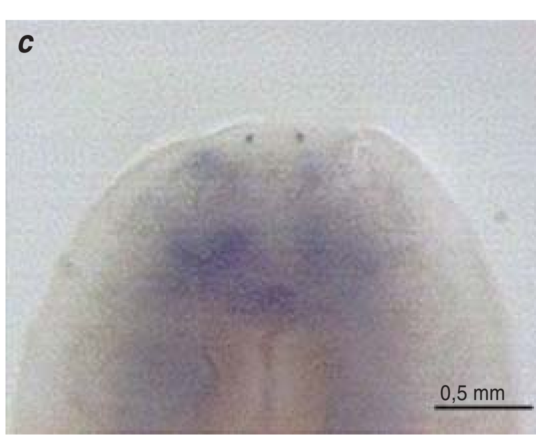
GENES MAS IMPORTANTES DEL DESARROLLO INICIAL DEL OJO DE VERTEBRADOS ORTOLOGOS A LOS DE *DROSOPHILA*

GENES DE VERTEBRADO	ORTOLOGOS DE *DROSOPHILA*	EXPRESION EN EL OJO DE VERTEBRADOS	PERDIDA DE FUNCION	GANANCIA DE FUNCION
Pax6	*ey, toy*	PLACODA DE LA LENTE, VESICULA OPTICA	ANIRIDIA (HOMBRE); *SMALL EYE* (RATON)	LENTES Y RETINA ECTOPICAS (*XENOPUS*)
Bmp4	*dpp*	VESICULA OPTICA, ECTODERMO CEFALICO	AUSENCIA DE LA PLACODA DE LA LENTE (RATON)	EXPANSION DE LOS MARCADORES DORSALES Y REPRESION DE LOS VENTRALES (POLLO)
Eya1	*eya*	MESENQUIMA PERIOPTICO Y EN LA LENTE	CATARATAS (HOMBRE)	
Six1	*so*	PLACODA DE LA LENTE, VESICULA OPTICA	HOLOPROSENCEFALIA, MICROFTALMIA (HOMBRE)	LENTES Y RETINA ECTOPICAS (PEZ *MEDAKA*)
Six3	*optix*	VESICULA OPTICA	ANOFTALMIA (HOMBRE)	EXPANSION DE LA NEURORRETINA (*XENOPUS*)
Dach1	*dachhund*	VESICULA OPTICA		
Crx	*orthodenticle*	RETINA NEURAL	RETINITIS PIGMENTOSA, AMAUROSIS CONGENITA DE LEBER (HOMBRE); DEFECTOS EN LA RETINA (RATON)	
Rax	*DRx*	VESICULA OPTICA	AUSENCIA DE VESICULAS OPTICAS (RATON)	
Sonic hedgehog	*hedgehog*	LINEA MEDIA VENTRAL DEL CEREBRO	HOLOPROSENCEFALIA, (HOMBRE); PERDIDA PARCIAL DE LA VESICULA OPTICA (PEZ CEBRA)	EXPANSION DE LA VESICULA OPTICA (PEZ CEBRA)

EMILI SALO







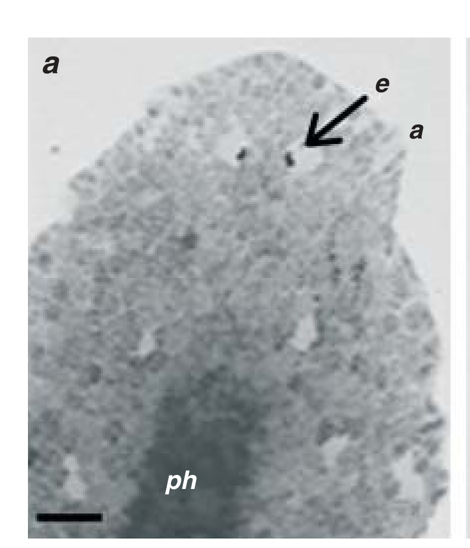
7. EXPRESION DE LOS GENES *six-1* y *six-3* de planaria. En *a* y *c* se muestra la señal azul de hibridación con la sonda six-1; se ponen de manifiesto las células fotorreceptoras de un ojo diferenciado adulto (*a*); en (*c*) se ofrece la señal en las células precursoras del ojo situadas dentro del blastema, o tejido de regeneración de planaria, a los tres días de regeneración cefálica. La imagen del centro (*b*) corresponde a la señal de hibridación *in situ* del gen *six-3*; éste no se expresa en el ojo, sino en las ramas laterales, que conectan los sensores ubicados alrededor de la epidermis cefálica con los ganglios cefálicos (*flechas*).

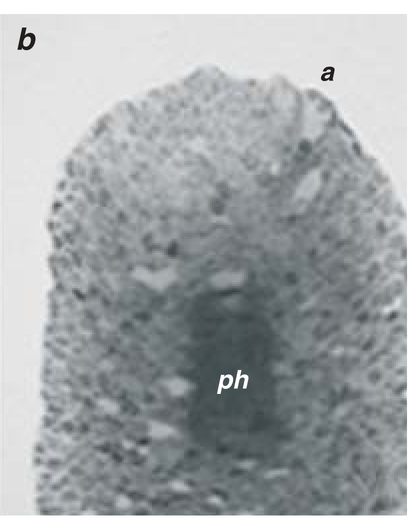
En el caso de *Drosophila*, el gen *Pax2* se halla implicado en la determinación de las células cónicas y las células pigmentarias del omatidio. Pero la deficiencia del mismo gen altera, en ratones, el ojo, riñón y oído interno. El gen *PaxB* presenta una caja "paired" más parecida a *Pax2* que a *Pax6*; además, sus posiciones clave de unión al ADN se asemejan a las de *Pax2*. Añádase que la región conservada del octapéptido, entre las dos cajas "paired" y "homeótica", es característica de *Pax2*, pero no de *Pax6*. Por otra parte, el dominio homeótico de *PaxB* guarda un parecido mayor con el de *Pax6* que con el de *Pax2*; se halla, este último, truncado en su extremo C-terminal. Se ha llegado a la determinación de tales características mixtas de *PaxB* mediante estudios funcionales, que revelan que la sobreexpresión del gen *PaxB* en *Drosophila* promueve la formación de ojos ectópicos y se muestra capaz de asumir la pérdida de función del gen *Pax2*.

De todo ello se infiere que el gen *PaxB* de la cubomedusa podría ser el ancestro de los genes *Pax6* y *Pax2* de los organismos triploblásticos o Bilaterales (*figura 10*). La investigación morfológica de la larva planuda de *Tripedalia*, acometida por Karin Nordström y colaboradores, de la Universidad de Lund, muestra otra peculiaridad primitiva de estas medusas. Las larvas tienen una organización muy simple, sin células nerviosas, aunque con ocelos distribuidos por la epidermis. (Los ocelos son estructuras unicelulares que contienen gránulos pigmentarios protectores y microvellosidades con fotopigmento.)

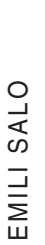
Los ocelos, células fotorreceptoras rabdoméricas, no establecen conexiones con ninguna otra célula. Gracias a su cilio motor, a modo de timón, la larva dirige el movimiento en función de la intensidad y dirección de la luz: con otros cilios reman sin cesar y puede girar a unas dos revoluciones por segundo.

Las células fotorreceptoras unen las estructuras y funciones de la fotorrecepción, pigmentación y movimiento en función de la luz, cual si se tratara de un organismo uni-





8. INHIBICION DE LA CAPACIDAD REGENERATIVA del ojo de planaria por interferencia con ARN de doble cadena del gen *six-1*. El panel de la izquierda (*a*) muestra un organismo control inyectado con ARN de doble cadena de un gen bacteriano, la beta-galactosidasa; la planaria presenta los ojos totalmente regenerados 15 días después de su regeneración. A la derecha (*b*), otra planaria inyectada con ARN de doble cadena del gen *six-1*, en un estadio de regeneración equivalente al control. Este organismo se nos ofrece con la cabeza totalmente regenerada, aunque sin ojos diferenciados. La inhibición de la función del gen *six-1* genera un fenotipo sin ojos. Aurículas (*a*), región cefálica lateral donde se concentran quimiorreceptores; ojos (*e*); faringe (*ph*). La barra de referencia equivale a 0,5 mm.



celular o un protista. Otro ejemplo es *Chlamydomonas*, alga unicelular. Posee ésta un orgánulo ocular (un "ojo") con fotopigmento derivado de la rodopsina y pigmento protector típico de manchas oculares; el orgánulo opera a modo de antena direccional, que le permite orientarse en referencia a la dirección de la luz. De forma similar a lo observado en larvas de medusas, el orgánulo ocular de *Chlamydomonas* se encuentra muy cerca del orgánulo efector, la base del flagelo; regula el movimiento del cilio y, por tanto, su fototropismo.

Evolución de los ojos

Darwin no halló ninguna dificultad en explicar la evolución de los ojos por selección natural a partir de ojos simples, como los de Platelmintos. Pero, ¿cómo se generó este ojo prototípico? Hemos descrito los orgánulos ópticos en protistas, formados por agregación de moléculas en el interior de una célula, un fenómeno totalmente distinto de los mecanismos de control genético de la morfogénesis. Dado que la aparición de un ojo prototípico constituye un evento estocástico altamente improbable, irrepetible por ende, la hipótesis de un origen polifilético de los ojos parece inviable.

Disponemos, por otro lado, de una serie de pruebas que apoyan un origen común de las estructuras oculares del mundo animal, y por tanto que respaldan la tesis monofilética. Hemos abordado ya la extraordinaria persistencia del circuito genético inicial de determinación de células de los ojos, gobernadas por los genes *Pax6, sine oculis, eye absent* y *dachshund* en todos los organismos bilaterales estudiados.

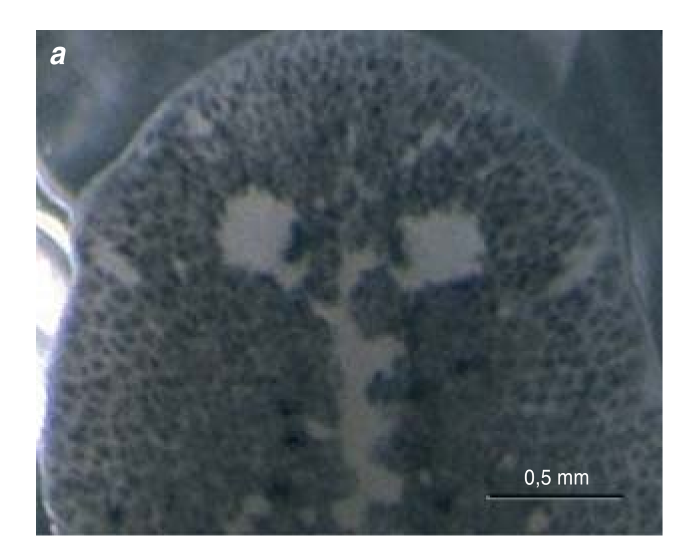
La universalidad de ese circuito genético viene reforzada con la observación de que no sólo se mantienen el circuito y las secuencias de los genes reguladores del desarrollo del ojo, sino también las regiones reguladoras *cis* ("enhancers" o potenciadores y silenciadores) de los genes regulados. Un buen ejemplo lo obtuvo Ernst Wimmer y sus colaboradores, de la Universidad de Múnich, al producir una quimera que contenía la región *cis*-reguladora de la rodopsina (denominada P3), repetida en tándem tres veces, junto a un promotor mínimo y un gen chivato o marcador de proteína fluorescente verde (GFP).

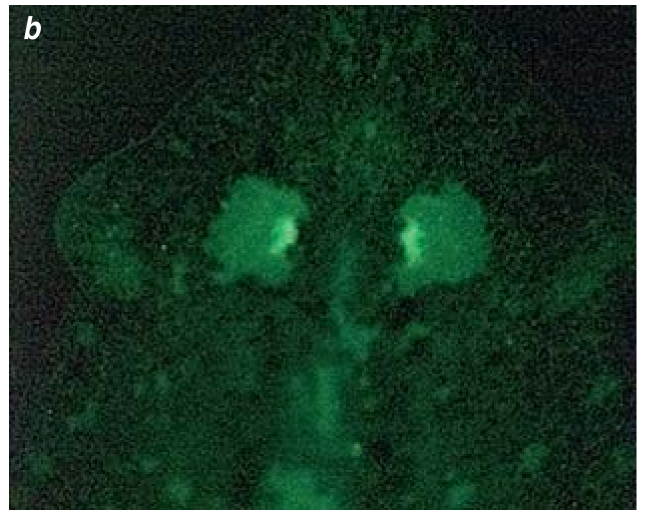
Se ha comprobado que especies muy diversas, incluidos los platelmintos, transformadas con dicha estructura quimérica expresan la GFP en sus ojos. Ello muestra que la proteína Pax6 de estos organismos es capaz de reconocer el mismo promotor y activar el gen *GFP*.

Una tercera prueba del origen común de los sistemas de detección de luz en los organismos bilaterales proviene de los fotopigmentos. Constan éstos de dos moléculas: el retinal, que transduce la energía de la luz en señal eléctrica, y la opsina, proteína de soporte con varios dominios transmembrana, que se une covalentemente al retinal. Todas las células fotorreceptoras estudiadas presentan el mismo tipo de fotopigmentos. Las células fotorreceptoras aumentan la superficie de su membrana para alojar más fotopigmento e incrementar la sensibilidad a la luz.

Se han descrito dos tipos celulares básicos, las células fotosensibles ciliadas, donde la membrana se invagina en discos internos, y los fotorreceptores rabdoméricos, donde la parte apical de la membrana celular se invagina en forma de microvellosidades. Ambos tipos celulares se pueden encontrar en distintas fases larvarias y adultas de una misma especie. En otros casos, aparece un solo tipo en todo el filo animal; por ejemplo, en los ojos de vertebrados dotados de células fotorreceptoras ciliadas.

Desde un punto de vista molecular, se observa la persistencia de los mecanismos de transducción de la señal luminosa en eléctrica; se recurre a un mismo fotopigmen-





9. OJOS VERDES EN LA PLANARIA TRANSGENICA *Girardia tigrina*. Se ha manipulado genéticamente el animal por electroporación con el vector derivado de *Hermes*, que regula la expresión de una proteína fluorescente verde ("Green Fluorescent Protein", GFP), con un potenciador ("enhancer") específico de *Pax6*. Las dos fotografías muestran el mismo organismo iluminado con luz visible (*izquierda*) o con luz ultravioleta (*derecha*). En las planarias adultas, el gen *Pax6* u otro gen con propiedades similares activan la expresión de la construcción exclusivamente en los ojos.

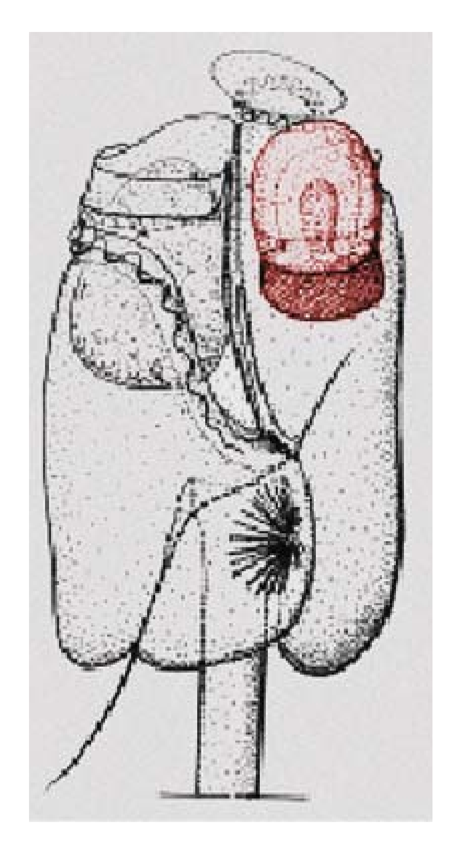
EMILI SALO

to, basado en la vitamina A y a la apoproteína opsina. La fototransducción requiere la unión de la opsina fotoactivada a la subunidad alfa de una proteína G. La subsiguiente interrupción (“quenching”) de la cascada de fototransducción se sirve también de mecanismos moleculares similares: utiliza una rodopsina quinasa, que fosforila la opsina fotoactivada, y la arrestina, que compite con la subunidad alfa de la proteína G por unirse con la opsina. No obstante, se aprecian diferencias en el segundo mensajero de la fototransducción: los vertebrados usan el GMP cíclico; los invertebrados, el inositol trifosfato.

Evolución independiente

Frente a estas pruebas a favor de un origen común, encontramos otras que avalan una evolución independiente de las estructuras oculares. Un primer ejemplo nos lo ofrece la lente o cristalino. Esta estructura está constituida en buena medida por proteínas hidrosolubles transparentes, que confieren al cristalino su índice de refracción y, por tanto, sus propiedades ópticas. Por biología molecular comparada sabemos que la composición del cristalino varía en grado sumo de una especie a otra en un mismo filo. Las moléculas que componen el cristalino derivan, a veces, de las mismas enzimas metabólicas, de enzimas de estrés u otras proteínas de función fisiológica que se expresan en tejidos donde no tienen ninguna función refractiva.

Semejante fenómeno de intercambio génico puede considerarse un preludio de la duplicación génica. Se trata de un caso de oportunismo molecular tan eficaz, que la mayoría de los organismos lo han aplicado. Podemos mencionar, entre otros ejemplos, las pequeñas proteínas de choque térmico/cristalino-α en vertebrados, la lactato deshidrogenasa B4/cristalino-ε de patos y cocodrilos, la enolasa-α/cristalino-τ de tortugas, la arginino succinato liasa/cristalino-δ de aves y reptiles, la aldehído deshidrogenasa/cristalino-o de cefalópodos y vieiras, y la proteína relacionada con la saponina/cristalino-J3 de las cubomedusas.



10. ORGANULO OCULAR del dinoflagelado unicelular *Erythropsis pavillardi*. En este dibujo esquemático se resalta en color el orgánulo “ojo”.

EMILI SALO; IMAGEN MODIFICADA DEL C. GREUET EN 1965

Todas esas proteínas forman parte de distintos cristalinos, de vertebrados e invertebrados. La evolución de la lente no sólo estriba en la acumulación de un producto proteico refráctil; se requiere también un gradiente de concentración que permita al cristalino enfocar correctamente la luz. A ese aspecto, imprescindible para producir un cristalino funcional, hemos de añadir que los genes implicados presentan los mismos elementos *cis*-reguladores que les permiten activarse en el cristalino a través de la proteína Pax-6.

Podemos, pues, afirmar que la composición proteica de los distintos cristalinos no es homóloga; sí lo es la estrategia para construir tales lentes. A partir del circuito inicial, cualquier gen que codifique una proteína con el índice de refracción adecuado puede entrar a formar parte del cristalino del ojo si adquiere un elemento *cis*-regulador reconocido por Pax-6.

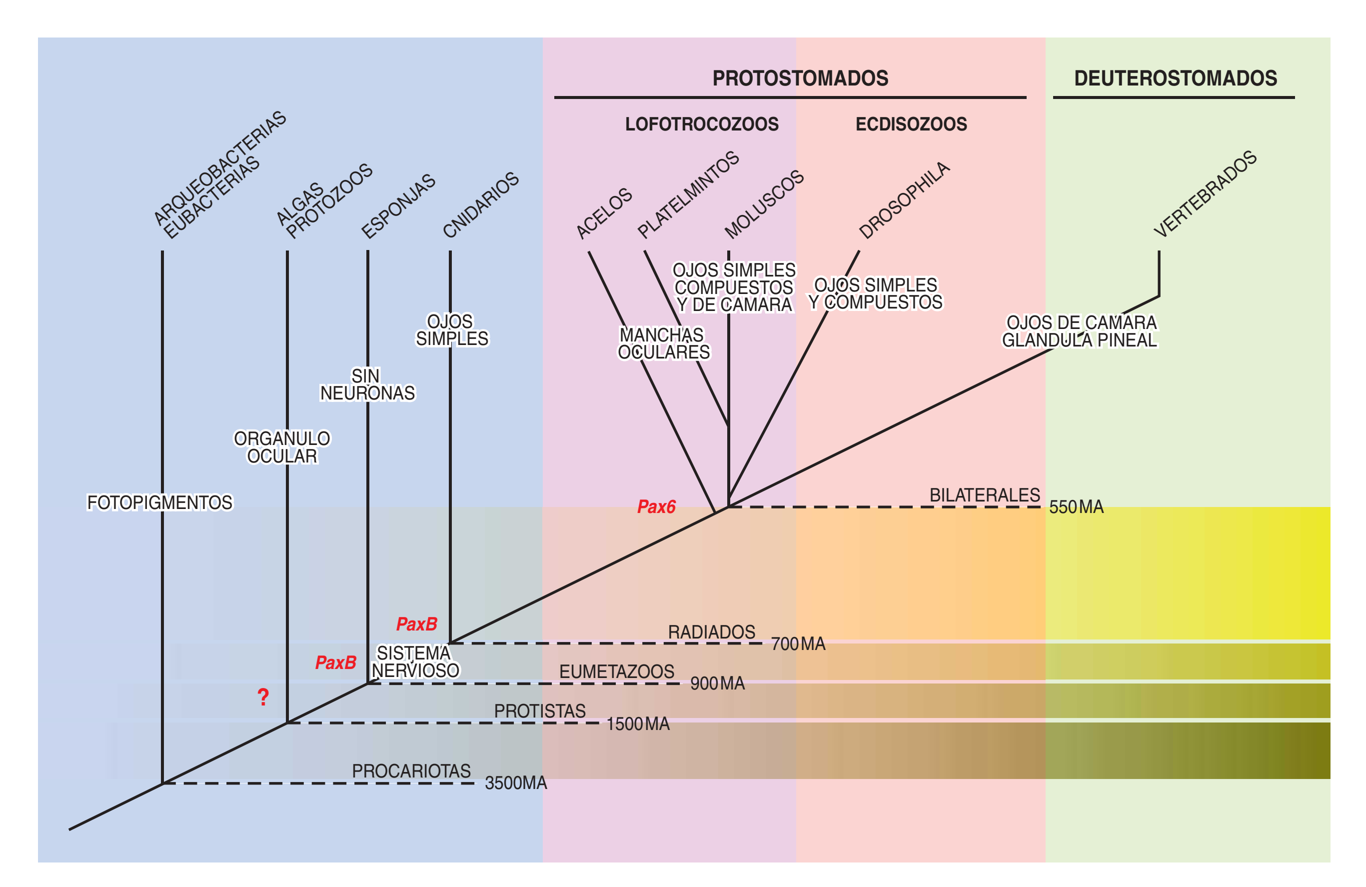
Otra prueba que apoya la tesis de la evolución independiente a partir de un ojo prototípico común nos lo ofrece el estudio comparado del desarrollo de tipos de ojos similares. Uno de los ejemplos más claros de convergencia evolutiva lo encontramos en los ojos de cámara de cefalópodos y vertebrados. Aunque los ojos de ambos guardan un extraordinario parecido estructural, conviene no confundir semejanzas con homologías.

Durante el desarrollo del ojo de vertebrados, la retina neural se forma a partir de la vesícula óptica del cerebro anterior ventrolateral; éste insta luego a la capa interna de la epidermis el desarrollo del cristalino; por último, el cristalino induce a la capa exterior epidérmica que proceda a la diferenciación de la córnea. En los cefalópodos, sin embargo, la retina neural se origina de la placoda del ojo; cristalino y córnea se generan por sucesivas invaginaciones del ectodermo, que van envolviendo el ojo en desarrollo. Por fin, en los cefalópodos, el cristalino es acelular y se produce por secreciones celulares. Además, si en los vertebrados la retina se dispone de forma invertida, con los fotorreceptores dirigidos hacia el fondo del ojo, en los cefalópodos aparece evertida, con los fotorreceptores orientados hacia el frente del ojo.

Debate abierto

No se ha dirimido, pues, la controversia entre monofiletismo y polifiletismo, que empezó con Darwin. Mientras que las comparaciones morfológicas de la anatomía del ojo y de los tipos celulares fotorreceptores sugieren que ese órgano habría evolucionado múltiples veces de forma independiente, la persistencia molecular de la red génica inicial de inducción de los ojos, sumada al hecho de compartir los mismos fotopigmentos, abonan la tesis de un ancestro común, simple y prototípico.

Aun cuando se parta de un núcleo organizativo prototípico común, la diversidad de moléculas solubles que componen la lente en cuanto elemento de refracción, así como la variedad de mecanismos embrionarios que conducen a la formación de ojos similares entre dis-



11. EVOLUCION DE LOS GENES *Pax* Y DE LA FOTODETECCION. Las fechas de aparición de los grandes grupos de organismos en la Tierra son indicativas y su valor preciso está sujeto a controversia. Los primeros organismos generaron ya fotopigmentos. Más tarde, aparecieron los orgánulos oculares, seguramente por endosimbiosis. Los primeros ojos pluricelulares en forma de ojos simples se dieron en los Cnidarios y, aunque no se conoce su origen, se especula con la probabilidad de un nuevo proceso de endosimbiosis y transferencia horizontal de la información genética. En esponjas (sin neuronas) y Cnidarios se ha caracterizado *PaxB*, un posible gen ancestral de *Pax6*. Pese a su diversidad, los ojos de todos los organismos bilaterales comparten características genéticas, lo que abona la hipótesis de un origen común. Pero también observamos diferencias entre ellos por lo que respecta al desarrollo embriológico, organización celular o composición del cristalino, lo que respalda la hipótesis opuesta de una evolución independiente a partir del ancestro común. En los últimos años ha surgido un candidato a este antepasado común: los acelos; se trata de organismos situados filogenéticamente en la base de todos los bilaterales, poseen el gen *Pax6* y los fotorreceptores de sus manchas oculares presentan características intermedias entre los ciliares y los rabdoméricos.

EMILI SALO

tintos filos, sugieren una evolución independiente posterior. Por otro lado, la equiparación del resultado final entre los ojos de cámara de moluscos y vertebrados, así como entre los ojos compuestos de moluscos, anélidos e insectos, sugiere un fenómeno de canalización durante el curso evolutivo. Tenemos, pues, que los distintos filos llegan a soluciones oculares similares a través de mecanismos distintos. Hay un número finito y reducido de morfologías que generen órganos capaces de ver.

Origen de la fotorrecepción

Sobre la generación de las primeras células fotorreceptoras de las cuales surgiría el ojo prototípico existen varias hipótesis. ¿Qué se sabe en realidad del origen de la fotorrecepción? Se ha observado un parecido entre las opsinas y el receptor del AMP cíclico de *Dictyostelium*, una ameba social de vida libre. Puesto que el receptor en cuestión cumple una función quimioatractiva, se sospecha que pudiera haber una relación entre el sistema de olfacción y la visión, hasta el punto de proceder la segunda del primero. Conviene recordar, a este respecto, que el gen *Pax6* no sólo está relacionado con el desarrollo del ojo, sino también con la morfogénesis de la nariz, de los órganos quimiosensores y con el cerebro. Las deleciones de los genes *Pax6* de mamíferos determinan alteraciones en los ojos, la glándula pineal, la nariz y el cerebro anterior. En *Drosophila,* mutantes nulos del gen *Pax6* producen moscas sin la cápsula de la cabeza que contiene los ocelos, ojos compuestos, antenas y palpos maxilares. Por consiguiente, el control común por *Pax6* de ojos, nariz y cerebro apoya la coevolución de estos órganos.

Pero ahondemos más en el origen de la fotorrecepción. Sabido es que la luz ha constituido una de las fuerzas selectivas más poderosas de la evolución. Los procariotas desarrollaron moléculas sensibles a la luz; en particular, bacteriorro-

dopsinas, necesarias para sus reacciones fototróficas. Aunque las bacteriorrodopsinas no muestran ninguna homología de secuencia con las rodopsinas de los eucariotas, sí se semejan en su configuración tridimensional, con siete dominios transmembrana de hélices alfa y el mismo grupo cromóforo, el retinal.

Para ciertos autores, la fotorrecepción pudo haberse iniciado en cianobacterias que, con el tiempo, se incorporarían como simbiontes en células eucariotas, para dar lugar a los cloroplastos. De hecho, el alga unicelular colonial *Volvox* tiene una rodopsina similar a la rodopsina visual de invertebrados en una mancha ocular presente entre las membranas tilacoides de sus cloroplastos.

Una hipótesis alternativa se basaba en la investigación de C. Greuet. En 1965, mientras preparaba su tesis doctoral en la estación marina de Villefranche-sur-Mer, observó un fenómeno peculiar en *Erythropsis pavillard,* dinoflagelado unicelular del plancton marino. A diferencia de la mayoría de los dinoflagelados, *E. pavillard* carecía de cloroplastos, si bien mostraba un impresionante orgánulo ocular con córnea, cristalino, copa pigmentada y un tipo de organización parecida a la retina, con membranas similares a los rabdómeros (*figura 11*). Greuret propuso que tales orgánulos ópticos ("ojos") podrían derivar de los cloroplastos.

De acuerdo con este modelo, de las cianobacterias se generarían los primeros fotopigmentos, incorporados luego por los eucariotas primarios, huéspedes por endosimbiosis para dar lugar a los cloroplastos, algunos de los cuales condujeron a los primeros orgánulos oculares. En particular, las proteorrodopsinas de dinoflagelados son muy similares a las de estas bacterias.

Más aún. Suele ser habitual la presencia endosimbionte de dinoflagelados en el interior de cnidarios. Apoyado en ello, Walter Gehring ha avanzado la idea de que algunos de los genes necesarios para desarrollar la fotorrecepción pudieran haber sido adquiridos de los dinoflagelados por los cnidarios. La simbiosis entre dinoflagelados y cnidarios permitieron a éstos incorporar en su núcleo los genes responsables de la fotorrecepción. No faltan ejemplos de transmisión horizontal de genes de endosimbiontes en el genoma de cnidarios.

Queda aún por resolver cómo se transforma la información desde un componente subcelular, el orgánulo ocular, hacia una estructura multicelular. Tendremos que esperar a conocer mejor los genomas de los organismos y comprender de qué modo esta información lineal se transforma en una información tridimensional como es la morfogénesis de órganos y, en concreto, la formación del ojo.

El autor

Emili Saló se doctoro en biología en 1984 en la facultad de biología de la Universidad de Barcelona, donde actualmente es catedrático y director del departamento de genética. Realizó su formación postdoctoral en la Universidad de Basilea (Biozentrum). Saló dirige un grupo de investigación sobre la caracterización del proteoma de las células madre de los Platelmintos y en la determinación funcional del circuito genético de los ojos.

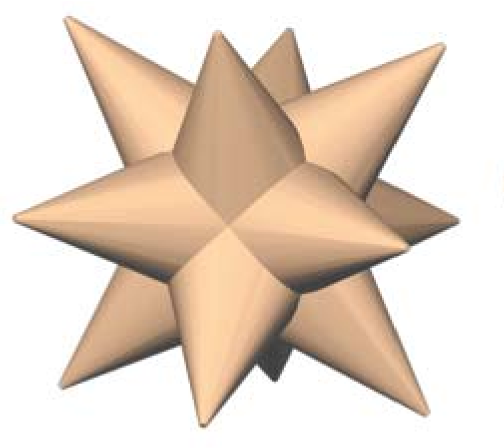
Bibliografía complementaria

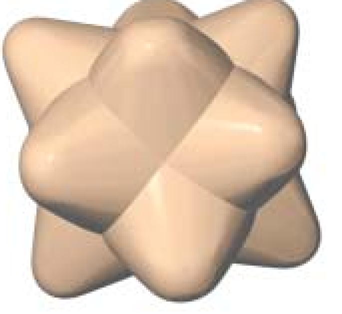
PAX6 MASTERING EYE MORPHOGENESIS AND EYE EVOLUTION. W.J. Gehring y K. Ikeo en *Trends Genetics*, vol. 15, págs. 371-377. 1999.

PAX GENES AND EYE ORGANOGENESIS. F. Pichaud y C. Desplan en *Current Opinion in Genetics & Development*, vol. 12, págs. 430-434. 2002.

EYE GENETIC NETWORK IN PLATYHELMINTHES: EXPRESSION AND FUNCTIONAL ANALYSIS OF SOME PLAYERS DURING PLANARIAN REGENERATION. E. Saló, D. Pineda, M. Marsal, J. González, V. Gremigni y R. Batistoni en *Gene*, vol. 287, págs. 67-74. 2002.

TRANSGENIC PLANARIAN LINES OBTAINED BY ELECTROPORATION USING TRANSPOSON-DERIVED VECTORS AND AN EYE-SPECIFIC GFP MARKER. C. González Estévez, T. Momose, W. J. Gehring y E. Saló en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, U.S.A., vol. 100, págs. 14.046-14.051; 2003.







Graham P. Collins

Póngase en pie y mire a su alrededor. Camine en círculo. Salte. Agite los brazos. Usted es una colección de partículas que se mueven en el seno de una pequeña región de una 3-variedad —un espacio tridimensional— que se extiende en todas las direcciones muchos miles de millones de años luz.

Las variedades son abstracciones matemáticas. Desde los tiempos de Galileo, el triunfo de la física ha consistido en la descripción fecunda de la realidad por medio de matemáticas de uno u otro jaez, como, por ejemplo, la matemática de las variedades. Según la física, el escenario en que todos los fenómenos acontecen es un espacio tridimensional (si dejamos aparte las especulaciones de la teoría de cuerdas, que declara la existencia de diminutas dimensiones aparte de las tres manifiestas) [*véase* "La teoría M", por Michael J. Duff; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1998]. Decir que las dimensiones son tres significa que para especificar la ubicación de una partícula son necesarios y suficientes tres números reales. En la vecindad de la Tierra, por ejemplo, podrían ser la latitud y longitud geográficas, más la altitud.

Según la física newtoniana y la física cuántica tradicional, el espacio tridimensional donde todo acontece es fijo e inmutable. La teoría de la relatividad general de Einstein, por el contrario, confiere al espacio un papel activo: la distancia de un punto a otro depende de la cantidad de materia y de energía que se encuentre en sus cercanías, así como de cualesquiera ondas gravitatorias que pasen por allí [*véase* "Ondas en el espacio-tiempo", por W. Wayt Gibbs; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2002]. Ahora bien, sea en el ámbito de la

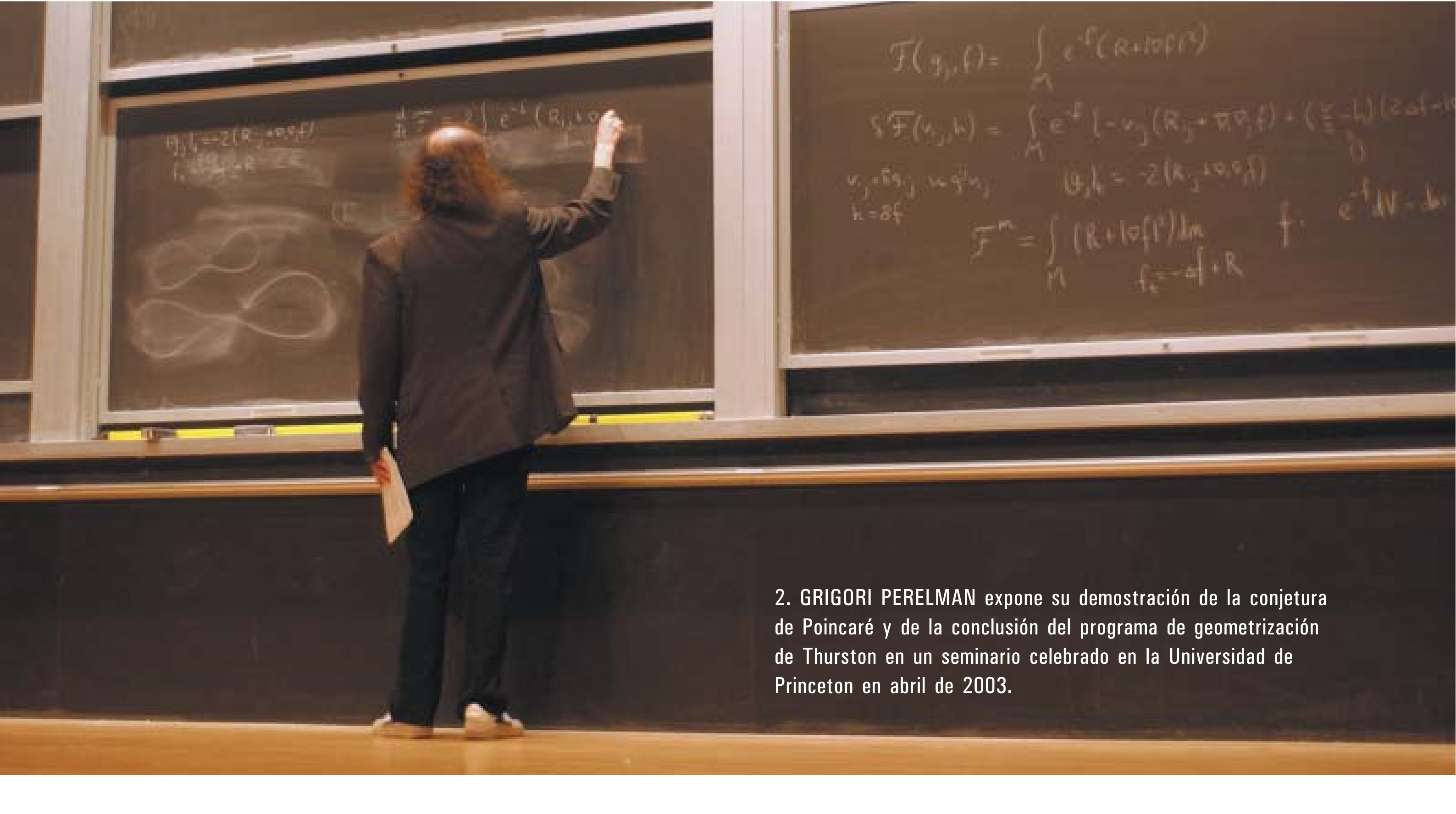
1. HENRI POINCARE conjeturó en 1904 que cualquier objeto tridimensional que compartiera ciertas propiedades de la esfera tridimensional podría transformarse en una 3-esfera. Fueron necesarios 99 años para que se lograse demostrar esta conjetura. (Cuidado: la esfera tridimensional no es lo que usted quizá piense.)

Las formas del espacio

Un matemático ruso ha demostrado la conjetura de Poincaré.
Así se completa la catalogación de los espacios tridimensionales.
Quizá reciba por ello un premio de un millón de dólares



AIP EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES (*fotografía*); ILUSTRACION DIGITALIZADA POR JANA BRENNING, DON FOLEY (*elementos en 3-D*)



2. GRIGORI PERELMAN expone su demostración de la conjetura de Poincaré y de la conclusión del programa de geometrización de Thurston en un seminario celebrado en la Universidad de Princeton en abril de 2003.

física newtoniana o en el de la einsteiniana, y tanto si es finito como si es infinito, el espacio está representado por una 3-variedad. En consecuencia, la comprensión de las propiedades de las variedades de tres dimensiones resulta esencial para entender cabalmente los cimientos sobre los que se alzan la física y casi todas las demás ciencias. (También las 4-variedades son importantes, pues el espacio y el tiempo integran, juntos, una 4-variedad.)

Es mucho lo que se sabe en matemáticas sobre las variedades de dimensión 3; aun así, algunas de las cuestiones más elementales han demostrado ser las más arduas. La rama de las matemáticas que estudia las variedades es la topología. Entre las cuestiones fundamentales que se plantean en topología respecto de las 3-variedades se cuentan: ¿cuál es el tipo más sencillo de variedad tridimensional, vale decir, la que tiene una estructura menos complicada? ¿Tiene una abundante parentela de variedades no menos sencillas, o, al contrario, es única? ¿Qué tipos de variedades tridimensionales existen?

La respuesta de la primera de estas preguntas es conocida desde hace mucho: la 3-variedad compacta más sencilla es un espacio llamado 3-esfera. (Las variedades no compactas son infinitas o tienen un borde. En lo sucesivo me limitaré a las variedades compactas.) Las otras dos cuestiones han estado en el aire durante un siglo: es posible que las haya respondido en 2002 Grigori ("Grisha") Perelman, un matemático ruso que, según parece, ha demostrado un teorema conocido como "la conjetura de Poincaré".

La conjetura, enunciada por el matemático francés Henri Poincaré hace ahora exactamente 100 años, dice que la 3-esfera es única y especial entre las 3-variedades; ninguna otra 3-variedad comparte con ella las propiedades que la hacen tan sencilla. Las 3-variedades más complicadas que la 3-esfera poseen fronteras contra las que se podría chocar, como si fueran muros de hormigón, o bien conexiones múltiples entre una región y otra, a modo de los senderos de un bosque, que se bifurcan y más adelante vuelven a juntarse. La conjetura de Poincaré enuncia que la 3-esfera es la única 3-variedad compacta que carece de todas esas complicaciones. Cualquier objeto tridimensional que comparta tales propiedades con la esfera puede, por consiguiente, remodelarse y adoptar la misma forma que una 3-esfera: por lo que a las propiedades topológicas concierne, dicho objeto es una mera reproducción de la 3-esfera. La demostración de Perelman responde también a

Resumen/Poincaré estaba en lo cierto

- Cien años han estado los matemáticos tratando de demostrar una conjetura formulada por Henri Poincaré relativa a la esfera tridimensional, o 3-esfera. Dicha conjetura singulariza a la 3-esfera y le confiere carácter excepcional entre los objetos que reciben en matemáticas el nombre de variedades tridimensionales.
- Se dispone al fin de una demostración de la conjetura de Poincaré, debida a Grigori Perelman, un joven matemático ruso. Este trabajo pone fin a un ambicioso programa de clasificación de todas las posibles variedades tridimensionales.
- Nuestro universo podría tener una forma de 3-esfera. Su estudio matemático presenta vínculos con la física de partículas y la teoría einsteiniana de la gravitación.

CELENE CHANG *Daily Princetonian*

la tercera de nuestras preguntas: completa los trabajos de clasificación de todos los tipos de 3-variedades que pueden existir.

Se requiere cierta agilidad mental para imaginar el aspecto de una 3-esfera (*véase el recuadro* "Música multidimensional de esferas"), pues no es una simple esfera en el sentido coloquial de la palabra. Pero sí comparte muchas propiedades con la 2-esfera, que nos es familiar a todos: la película de goma de un globo redondo constituye una 2-esfera. La 2-esfera es bidimensional porque solamente se necesitan dos coordenadas —la latitud y la longitud, por ejemplo— para situar inequívocamente un punto de ella. Además, si se recorta en el globo un disco muy pequeño y lo examinamos con una lupa, veremos que se parece muchísimo a un disco recortado de una lámina de goma perfectamente plana; apenas si presentará una leve curvatura. A un insecto diminuto que se moviese sobre el globo le parecería estar recorriendo una superficie llana. Empero, si el insecto caminase lo suficiente siguiendo siempre lo que le parecería una línea recta, acabaría por regresar al punto de partida.

De igual manera, un mosquito que se encontrase en una 3-esfera (o una persona, en una esfera tan grande como nuestro universo) se creería inmerso en el espacio tridimensional "ordinario". Pero si volase una distancia suficiente en "línea recta" en una dirección cualquiera acabaría por circunnavegar la 3-esfera y volvería a encontrarse en el punto de donde había partido, lo mismo que el insecto en su periplo sobre el globo o que un viajero que diera la vuelta al mundo.

Existen asimismo esferas para dimensiones distintas de tres. También la 1-esfera nos es bien conocida: es, sencillamente, una circunferencia (el contorno de un disco, no el disco propiamente dicho). La esfera n-dimensional recibe el nombre de n-esfera.

Demostrar conjeturas

Medio siglo hubo de transcurrir entre que Poincaré propuso su conjetura de la 3-esfera y que se lograse algún auténtico progreso en su demostración. En los años sesenta se obtuvieron demostraciones de las conjeturas análogas para dimensiones mayores o iguales que 5. En cada caso, la n-esfera es la única variedad de la correspondiente dimensión que tiene máxima sencillez. Paradójicamente, tal resultado resultaba más sencillo de demostrar para las esferas de dimensión grande que para las de dimensiones 4 o 3. La demostración correspondiente al caso de cuatro dimensiones, que es particularmente difícil, se logró en 1982. Solamente quedaba pendiente el caso que dio origen al problema, el de la 3-esfera de Poincaré.

Se dio un paso importante hacia la resolución del problema tridimensional en noviembre de 2002, fecha en que Perelman, adscrito al Instituto de Matemáticas Steklov de San Petersburgo, publicó un artículo en la Red, en el servidor www.arxiv.org, muy utilizado por físicos y matemáticos para dar difusión a sus nuevas investigaciones. El artículo de Perelman no mencionaba por su nombre la conjetura de Poincaré, pero los expertos en topología que lo leyeron se percataron inmediatamente de su pertinencia para el teorema. Perelman dio a conocer un segundo artículo en marzo de 2003, y desde abril a mayo de ese año visitó Estados Unidos, donde expuso sus resultados en una serie de seminarios en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y en la Universidad de Stony Brook. Desde entonces, equipos de matemáticos de casi una docena de instituciones punteras han estado escrutando sus artículos, verificando cada uno de sus detalles y buscando errores.

Perelman permaneció dos semanas en Stony Brook dando lecciones y charlas, lo mismo en sesiones formales que en reuniones informales, durante de tres a seis horas diarias. "Respondió a todas las cuestiones que fueron surgiendo con mucha claridad", recuerda el matemático Michael Anderson, de Stony Brook. "Nadie ha planteado todavía dudas serias." Queda aún un paso por demostrar, hasta cierto punto secundario, para dejar totalmente resuelto el problema, sigue diciendo Anderson, "pero no existen auténticas dudas de la validez de esa parte final". El primer artículo contiene las ideas fundamentales; en general, se acepta que está verificado. El segundo contiene aplicaciones y razonamientos de carácter más técnico; no ha alcanzado todavía el grado de ratificación del primero.

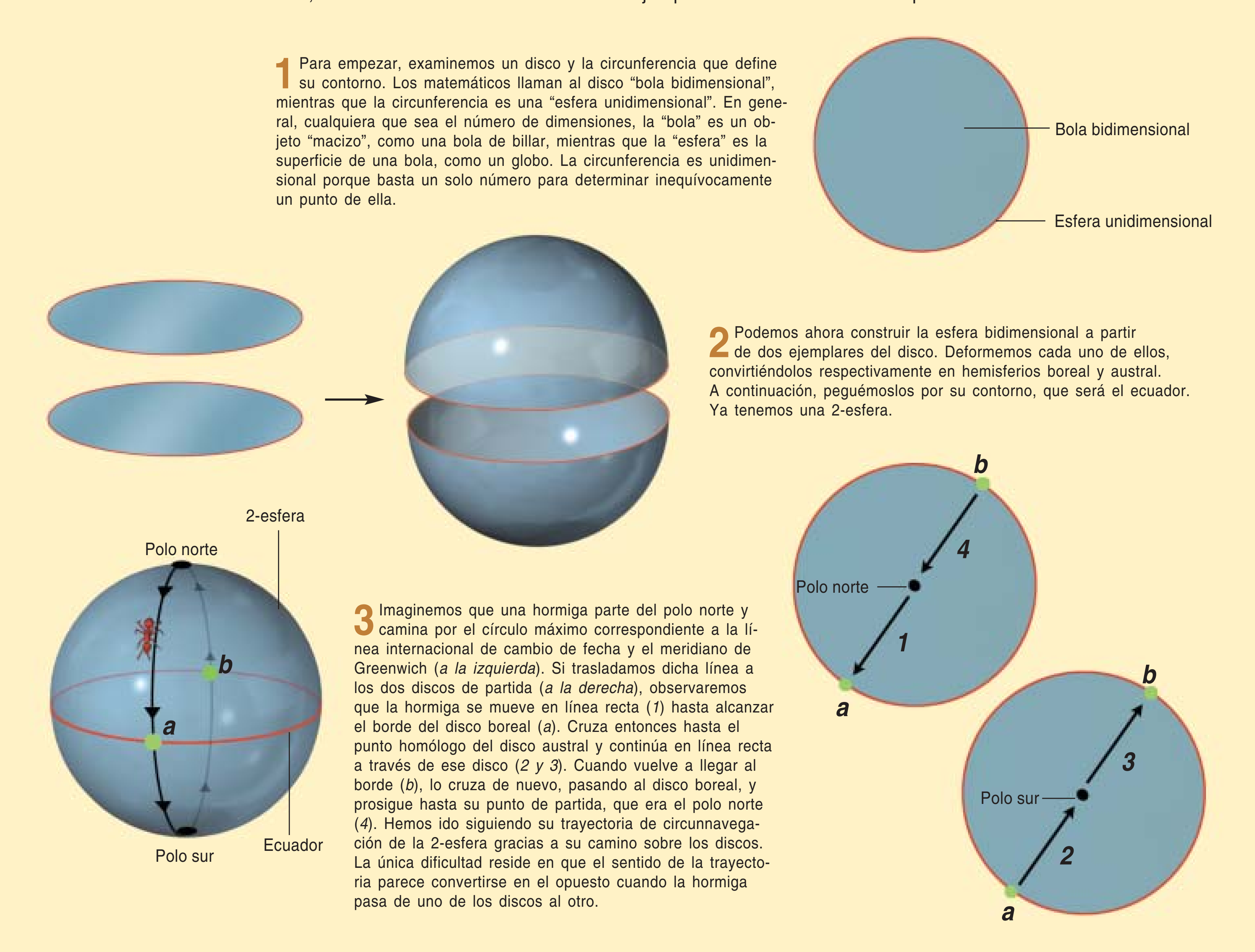
Hay un premio de un millón de dólares por demostrar la conjetura de Poincaré; es uno de los siete "Problemas para el cambio de milenio" seleccionados por el Instituto Clay de Matemáticas en el año 2000. La demostración de Perelman ha de publicarse y resistir dos años de escrutinio antes de aspirar al premio. (La institución podría perfectamente decidir que su inclusión en el servidor de la Red vale como "publicación"; sus textos allí presentados están siendo sometidos a una revisión por expertos tan rigurosa como la de cualquier artículo publicado en papel.)

El trabajo de Perelman generaliza y completa un programa de investigación desbrozado por Richard S. Hamilton, de la Universidad de Columbia, hará unos diez años. El Instituto Clay, en reconocimiento al trabajo de Hamilton, le otorgó un premio a la investigación a finales de 2003. Los cálculos y análisis de Perelman han dinamitado diversos obstáculos que cegaban la senda que Hamilton había tomado y que no había logrado despejar.

Si, como todos esperan, la demostración de Perelman es correcta, se habrán completado unos trabajos que alcanzan mucho más allá de la mera conjetura de Poincaré. La conjetura de Thurston sobre la geometrización —debida a William P. Thurston, actualmente en la Universidad Cornell— proporciona una clasificación completa de todas las posibles 3-variedades. La 3-esfera, excepcional en su simplicidad, constituye el punto de anclaje de esta clasificación. De haber sido falsa la conjetura de Poincaré, es decir, de existir otros espacios tan "simples" como la 3-esfera, la clasificación de las variedades tridimensionales se tornaría infinitamente más complicada que la propuesta por Thurston. En cambio, merced a los resultados de Thurston y de Perelman, se dispone ahora de una catalogación completa de las con-

Música multidimensional de esferas

La visualización de la 3-esfera, pieza clave de la conjetura de Poincaré, requiere cierto esfuerzo. Los matemáticos que estudian espacios de dimensión mayor que 3 no necesitan visualizarlos: se valen de propiedades abstractas y se guían mediante nociones intuitivas, basadas en situaciones análogas en dimensiones menores (teniendo siempre buen cuidado de no tomar las analogías como realidades). Podemos, de todos modos, hacernos una idea de cómo son estos objetos multidimensionales trabajando con ejemplos de menor dimensión que nos sean familiares.



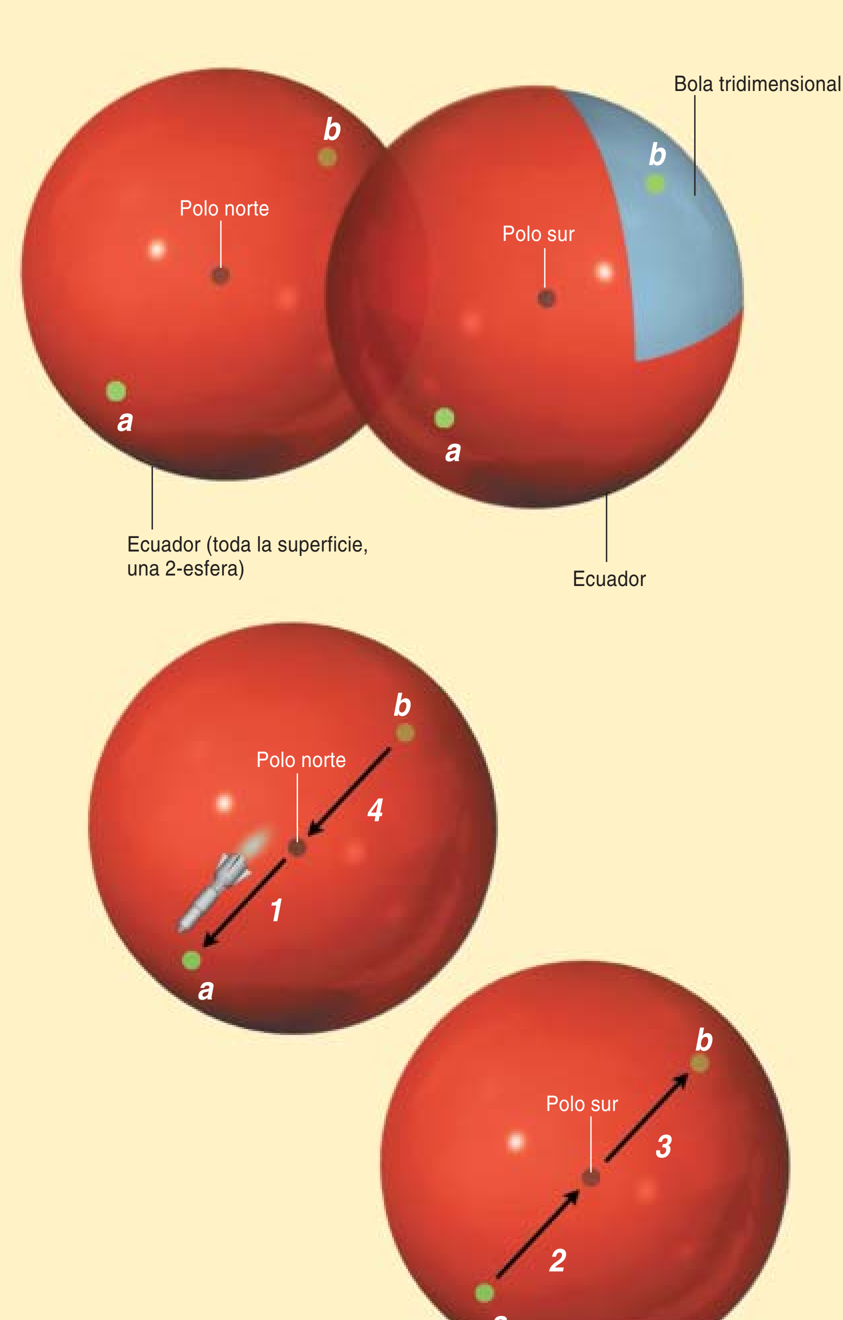
figuraciones posibles de un espacio tridimensional: la totalidad de las formas matemáticamente permisibles que nuestro universo (considerando solamente el espacio, y no el tiempo) podría tener.

Rosquillas de goma

Para comprender mejor la conjetura de Poincaré y la demostración de Perelman se requieren algunos rudimentos de topología. En esta rama de las matemáticas, la forma concreta de los objetos es irrelevante: es como si estuvieran hechos de arcilla de moldeado, de plastilina o chicle, de materiales que se puedan estirar, comprimir o retorcer cuanto se quiera. Ahora bien, ¿por qué habrían de interesarnos los objetos o los espacios hechos de una plastilina imaginaria? Porque la forma exacta de un objeto, determinada por las distancias que median entre todos sus posibles pares de puntos, corresponde sólo a un nivel de estructura del objeto, el geométrico. La topología, al estudiar objetos de plastilina, descubre aquellas propiedades del cuerpo de carácter tan fundamental e intrínseco que su existencia no depende de la conformación geométrica del objeto.

Si ha leído usted alguna explicación sencilla de qué es la topología, será muy probable que conozca este viejo dicho: para un topólogo, lo mismo es una taza que una rosquilla. Para él, sólo cuenta que podamos modelar una taza de plastilina y convertirla en una rosquilla sin tener que abrir nuevos orificios ni pegar trozos disjuntos (*véase el recuadro* "Topología de superfi-

DON FOLEY



4 Fijémonos ahora en nuestra 2-esfera y en el volumen tridimensional contenido en ella (una "bola tridimensional") y repitamos con la bola y la esfera lo que se hizo con el disco y la circunferencia: tomar dos ejemplares y pegar sus fronteras. No nos es posible visualizar cómo se han de deformar las bolas en el espacio de cuatro dimensiones para obtener sendas analogías de los hemisferios, pero tampoco es necesario: basta saber que se unen los puntos correspondientes de las superficies —de las 2-esferas—, como los puntos homólogos de las circunferencias. El resultado de esta unión de las dos bolas es la 3-esfera, la "hipersuperficie" de una bola de cuatro dimensiones. (En cuatro dimensiones, espacio donde verdaderamente residen la 3-esfera y la 4-bola, la "frontera" de los objetos es una "hipersuperficie" tridimensional.) Por analogía, diremos que una de las bolas es el hemisferio boreal, y la otra, el hemisferio austral. El polo norte se hallaría en el centro de la bola septentrional (al igual que antes habíamos marcado el polo norte en el centro del disco boreal.)

5 Imaginemos a continuación que estas bolas constituyen regiones grandes y vacías del espacio y que una nave espacial parte "en línea recta" del polo norte. La nave acabará llegando al "ecuador" (*1*), formado por la totalidad de la superficie esférica que envuelve a la bola septentrional. La nave atraviesa el ecuador y se interna en el hemisferio austral, prosigue en línea recta hasta pasar por el centro (el polo sur). Alcanza el ecuador en el punto diametralmente opuesto (*2 y 3*), que vuelve a atravesar hacia el hemisferio norte, hasta regresar a su punto de partida, el polo norte (*4*). Acabamos de imaginar un periplo por la hipersuperficie de una bola cuatridimensional, circunnavegándola. Esta 3-esfera, consistente en dos bolas unidas por sus superficies esféricas, es el espacio al que se refiere la conjetura de Poincaré. Nuestro universo quizá tenga la forma de una 3-esfera.

Este proceso puede ser transferido a cinco dimensiones, para formar una 4-esfera, pero la visualización de lo que ocurre resulta todavía más difícil. Análogamente, cualquier n-esfera dada puede ser construida a partir de dos n-bolas: basta pegar debidamente las fronteras de las dos bolas. Cada frontera es una n — 1-esfera, lo mismo que la frontera de un disco (una 2-bola) es una circunferencia (una 1-esfera). El resultado es una n-esfera que encierra una n + 1-bola.

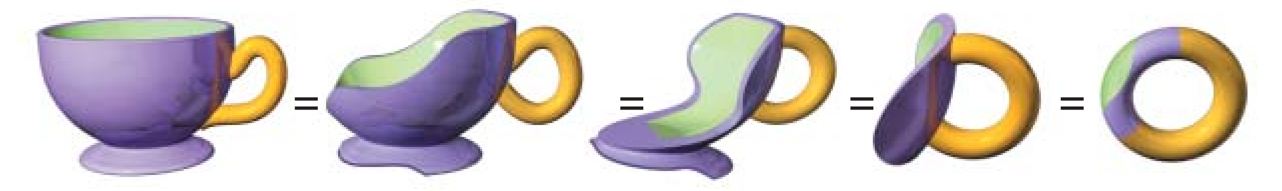
cies"). Por otra parte, no es posible modelar una bola y darle forma de rosquilla sin perforar un agujero a su través o sin estirarla y darle forma cilíndrica y pegar después los extremos del cilindro. Por ser necesario efectuar cortes o pegar piezas, una bola y una rosquilla son, en topología, entes distintos.

Pero lo que más interesa en el estudio topológico son las superficies de la bola y de la rosquilla —sus "fronteras"—, así que, en lugar de imaginar un sólido, deberíamos, en ambos casos, pensar en sendos globos. Las respectivas topologías siguen siendo distintas: el globo esférico no puede convertirse en un neumático —un globo de forma anular que recibe el nombre de toro— mediante meras deformaciones. Topológicamente, pues, una esfera y un toro constituyen entidades diferentes. Uno de los primeros problemas de la topología consistió en descubrir qué otros entes topológicos existen y de qué modo se podría caracterizarlos. En el caso de los objetos bidimensionales —o superficies—, la respuesta es nítida y clara: todo se reduce al número de "asas" de la superficie.

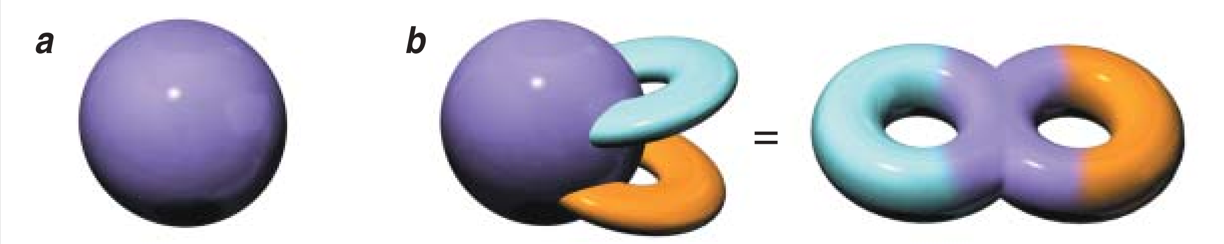
A finales del siglo XIX, los matemáticos habían comprendido el modo de clasificar superficies. Sabían que la esférica era única por su simplicidad. Imaginaron variedades tridimensionales. Para empezar, ¿sería la simplicidad de la 3-esfera tan única como la 2-esfera? La historia de los intentos de responder esta cuestión fundamental, que ya cuenta un siglo, está sembrada de pasos en falso y demostraciones falaces.

TOPOLOGIA DE SUPERFICIES

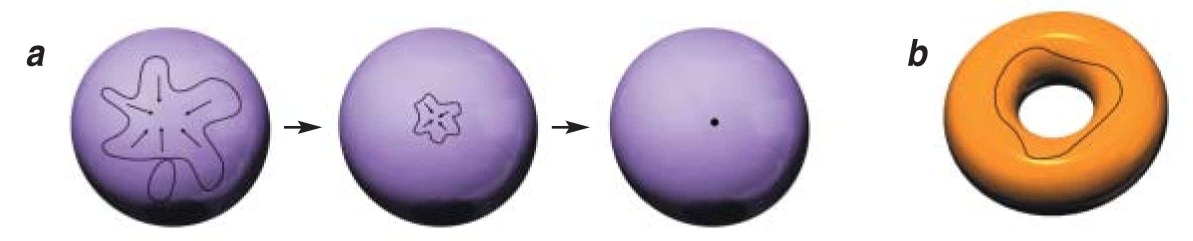
EN TOPOLOGIA, la forma exacta de los objetos —su "geometría"— no es lo verdaderamente importante. Es como si todo estuviera hecho de caucho o de plastilina y pudiera modelarse por estiramiento, compresión o retorcimiento. Sin embargo, están prohibidas operaciones que entrañen cortar o pegar. Por eso, en topología, cualquier objeto que tenga un solo agujero, como la taza de café de la izquierda, es equivalente a la rosquilla dibujada a la derecha.



PUEDE CONSTRUIRSE toda variedad bidimensional (una superficie) que sea compacta y orientable añadiendo asas a una esfera. La adición de un asa produce una superficie de primer género, cuyo paradigma es el toro, una superficie con forma de rosquilla (*arriba, a la derecha*). Al añadir dos asas se obtiene una superficie de segundo género, y así sucesivamente.



LA 2-ESFERA tiene, entre todas las superficies, la propiedad especial de que cualquier aro incrustado en una 2-esfera puede contraerse hasta convertirse en un punto (*a*). En un toro, por el contrario, un aro puede quedar "enganchado" en torno al orificio central (*b*). Todas las superficies, a excepción de la 2-esfera, tiene asas en las que el aro puede quedar atrapado. La conjetura de Poincaré propone que la 3-esfera es igualmente excepcional entre todas las variedades tridimensionales: todo aro puede ser contraído a un punto, mientras que en cualquier otra variedad, algunos quedarán enganchados.



DON FOLEY

Henri Poincaré abordó la cuestión frontalmente. Era uno de los dos matemáticos más destacados de principios del siglo XX (con David Hilbert). Se ha dicho de Poincaré que fue el último universalista: se encontraba en su ambiente en todas las ramas de las matemáticas, lo mismo puras que aplicadas. Aparte de su obra en numerosas áreas de las matemáticas, contribuyó a las teorías de la mecánica celeste y del electromagnetismo, así como a la filosofía de la ciencia, sobre la cual publicó varios libros que han sido muy leídos.

Poincaré fue el creador, en gran medida, de una rama de las matemáticas, la topología algebraica. Valiéndose de técnicas de esta especialidad logró formular, hacia 1900, una medida de la estructura topológica de los objetos, la homotopía. Para determinar la homotopía de una variedad, imaginemos que en ella se inserta un aro flexible (*véase el recuadro* "Topología de superficies"). Se puede enrollarlo alrededor de la variedad de todas las maneras posibles. Preguntamos entonces: ¿será posible en todos los casos contraerlo hasta que se reduzca a un punto, sin más que moverlo como convenga, pero sin llevar nunca parte alguna de él fuera de la variedad? En un toro, la respuesta es negativa. Si el aro rodea a la circunferencia del toro no resultará posible contraerlo hasta un punto: enlazará siempre el anillo interior de la rosquilla. La homotopía da una medida de cuántas formas hay de que un aro quede atrapado.

En una *n*-esfera, por muchas que sean las revueltas que dé el enrollamiento del aro, siempre será posible desenredarlo y contraerlo hasta un punto. (En estas manipulaciones es lícito hacer pasar el lazo a través de sí mismo.) Poincaré supuso que la única 3-variedad en la que todo lazo posible se puede contraer hasta un punto es la propia 3-esfera, pero

no consiguió demostrarlo. Con el transcurso del tiempo, esta hipótesis dio en ser conocida por conjetura de Poincaré. Muchos han sido, decenio tras decenio, quienes han anunciado que disponían de demostraciones; todas resultaron ser erróneas. (Para mayor claridad, aquí y en lo sucesivo dejaré de lado dos complicaciones, a saber, las variedades llamadas “no orientables” y las variedades con bordes. La banda de Möbius, por ejemplo, una cinta retorcida y pegada por sus extremos para cerrarla como un aro, no es orientable. Una esfera en la que se haya recortado un casquete tiene borde. También la banda de Möbius es una variedad con borde.)

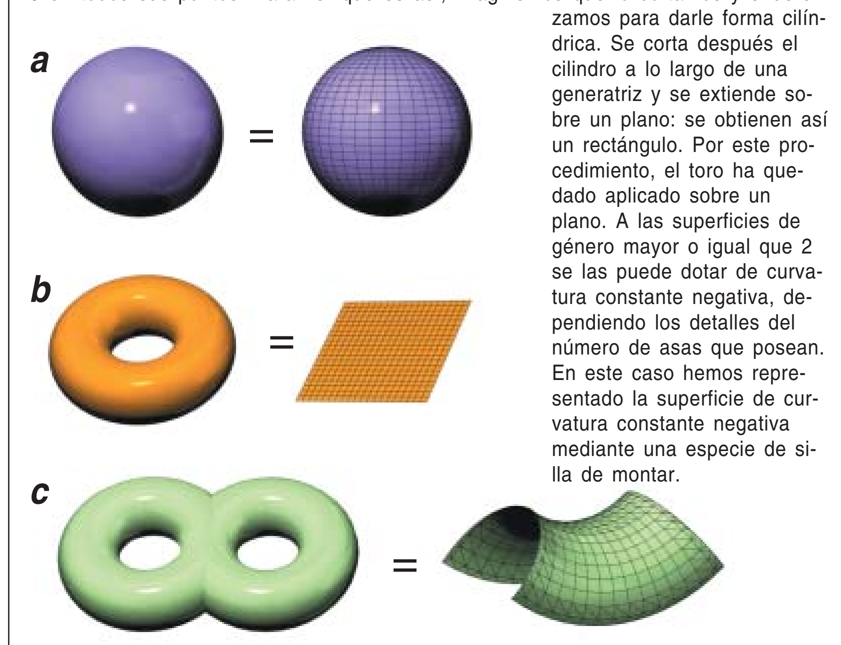
Geometrización

La demostración de Perelman es la primera que ha soportado un escrutinio minucioso. La metodología con que analiza las variedades tridimensionales guarda relación con un procedimiento denominado geometrización. La geometría se ocupa de la forma real de un objeto o de una variedad; los objetos, para la geometría, no son de arcilla blanda, sino de porcelana rígida. Una taza, por ejemplo, posee propiedades geométricas distintas de las de una rosquilla porque sus superficies se curvan de modos diferentes. Suele decirse que la taza y la rosquilla son sendos ejemplos de toro topológico (siempre que la taza tenga un asa y una sola) a los que se les han asignado geometrías diferentes.

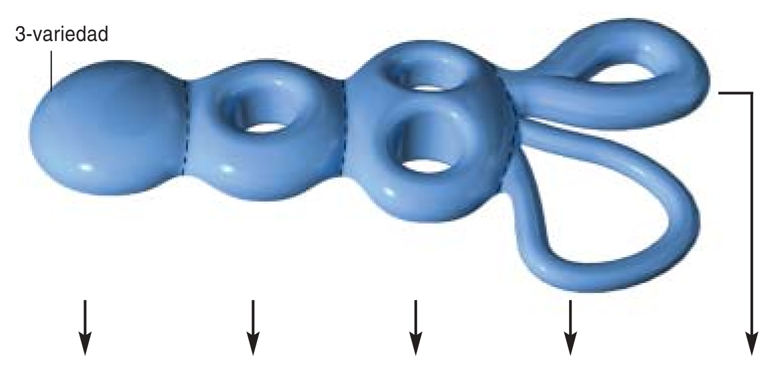
Para mejor comprender el modo en que Perelman se sirvió de la geometrización, examinemos cómo se puede utilizar la geometría para clasificar variedades bidimensionales, es decir, superficies. A cada superficie topológica se le asocia una geometría particular y única, a saber, aquella en que la curvatura de la superficie se halla distribuida de modo completamente uniforme por la variedad. En el caso de la esfera, en el sentido topológico de la palabra, esa geometría única es de una esfericidad, en el sentido ordinario geométrico, perfecta (*sic*). Aunque la forma ovoide constituye otra geometría posible para la esfera topológica, la curvatura de tal superficie no es la misma por toda ella: la punta más

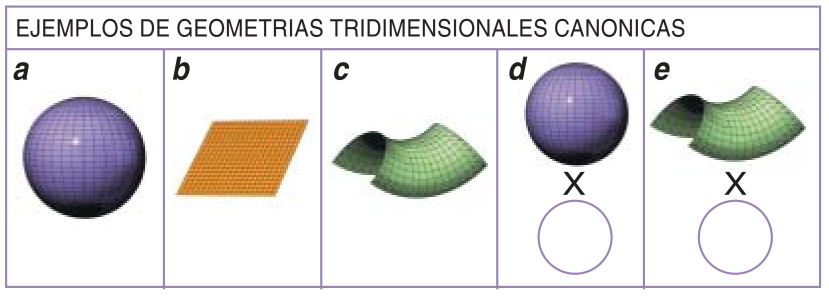
GEOMETRIZACION

LAS 2-VARIEDADES pueden clasificarse mediante la “uniformización” o “geometrización”, que comporta asignarles una forma rígida, una “geometría” específica. En concreto, cada una puede modelarse de manera que la curvatura de la figura resultante se encuentre distribuida por igual. La esfera (*a*) es la única figura que posee curvatura positiva constante, lo que significa que en cada punto se curva como una loma. Al toro (*b*) se lo puede “alisar”, es decir, proyectarlo en una variedad con curvatura 0 en todos sus puntos. Para ver que es así, imaginemos que lo cortamos y enderezamos para darle forma cilíndrica. Se corta después el cilindro a lo largo de una generatriz y se extiende sobre un plano: se obtienen así un rectángulo. Por este procedimiento, el toro ha quedado aplicado sobre un plano. A las superficies de género mayor o igual que 2 se las puede dotar de curvatura constante negativa, dependiendo los detalles del número de asas que posean. En este caso hemos representado la superficie de curvatura constante negativa mediante una especie de silla de montar.



LA CLASIFICACION DE LAS 3-VARIEDADES, que es semejante a la de las 2-variedades, pero mucho más complicada, ha quedado concluida gracias al trabajo de Perelman. En general, una 3-variedad tiene que dividirse en piezas, cada una de las cuales se puede moldear hasta convertirla en una de ocho geometrías tridimensionales canónicas. El ejemplo de color azul que vemos al pie (*ha sido dibujado en forma de 2-variedad*) consta de piezas equivalentes a cinco de ellas: geometrías tridimensionales de curvatura constante positiva (*a*), nula (*b*), o constante negativa (*c*), así como el “producto” de una 2-esfera y de una circunferencia (*d*) y de la superficie de curvatura negativa y una circunferencia (*e*).

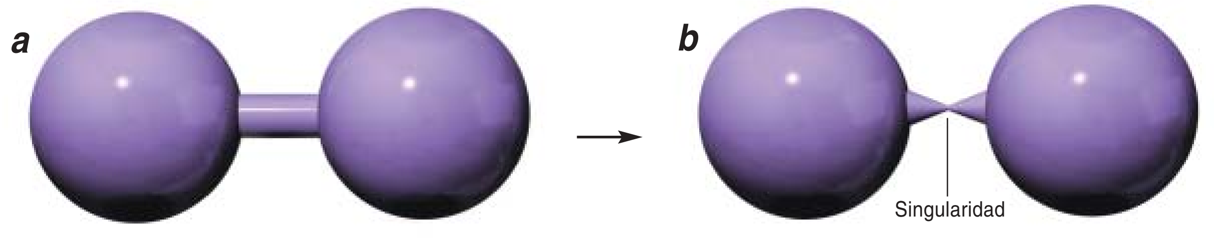




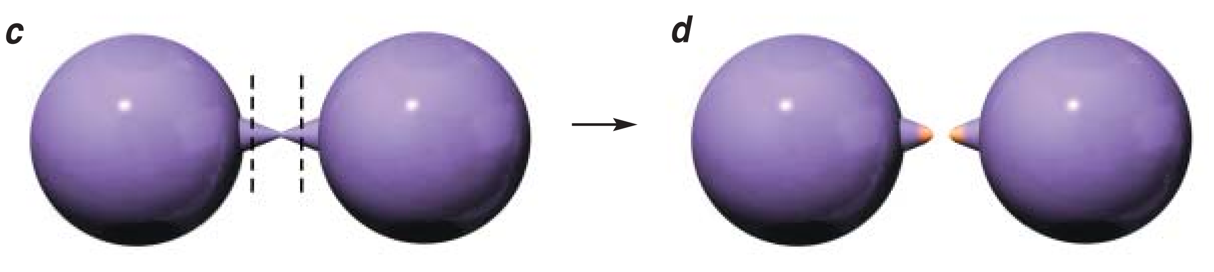
DON FOLEY

TRATAMIENTO DE LAS SINGULARIDADES

LAS TENTATIVAS de aplicar una ecuación, el flujo de Ricci, a fin de demostrar la conjetura de Poincaré y de geometrizar las 3-variedades tropezaban, antes de la intervención de Perelman, con un obstáculo. El flujo de Ricci, que va cambiando gradualmente la forma de una 3-variedad, provoca en ocasiones un tipo de dificultad conocido como singularidad. Se tiene un ejemplo cuando la forma de parte de la variedad es de mancuerna: dos esferas unidas por un tubo (*a*). El tubo puede quedar estrangulado y reducido a un punto, echando a perder las propiedades de la variedad (*b*). También se pensaba que era posible otra singularidad, la singularidad "en cigarro".



ES POSIBLE DAR "tratamiento quirúrgico" a las singularidades que surgen en el flujo de Ricci, como lo demuestra el trabajo de Perelman. Cuando empieza a producirse un estrangulamiento en la variedad, se amputa una pequeña región a cada lado de ese punto (*c*). Los cortes se taponan con pequeñas esferas y se continúa con el flujo de Ricci (*d*). Es posible que tal proceso haya de repetirse varias veces porque después se produzcan estrangulamientos en otras regiones, pero Perelman ha demostrado que el proceso no se repite indefinidamente. También ha demostrado que nunca llega a haber singularidades "en cigarro".



DON FOLEY

aguzada tiene mayor curvatura que el extremo romo.

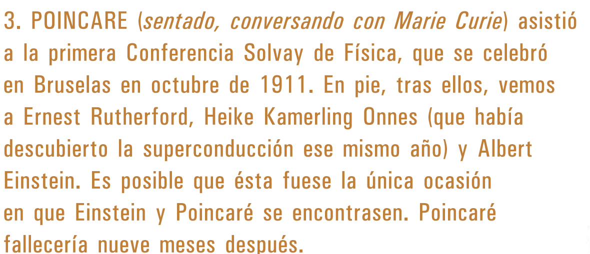
Las 2-variedades se agrupan en tres tipos geométricos (*véase el recuadro* "Geometrización"). La esfera posee curvatura positiva, lo mismo que una loma. El toro geometrizado es llano; tiene curvatura cero, al igual que una planicie. Las demás variedades, con dos o más asas, tienen curvatura negativa. Decir que la curvatura es negativa significa que la superficie es como una silla de montar o un paso entre montañas: la silla, en sentido longitudinal, se curva hacia arriba, pero en sentido transversal se curva hacia abajo. Poincaré (¿quién si no?), junto con Paul Koebe y Felix Klein (de quien recibe el nombre la famosa botella), contribuyó a esta clasificación geométrica, la geometrización, de las 2-variedades.

Nada más natural que tratar de aplicar métodos similares a las 3-variedades. ¿Será posible hallar, para cada 3-variedad topológica, una única geometría en la cual la curvatura se encuentre uniformemente repartida por toda la variedad?

Resulta que las 3-variedades son mucho más complicadas que las 2-variedades. A la mayoría de las 3-variedades es imposible asignarles una geometría uniforme. Es necesario, en cambio, descomponerlas en piezas, dotadas cada una de una geometría canónica diferente. Además, en lugar de existir tres geometrías fundamentales como en el caso de las 2-variedades, las piezas de 3-variedades pueden adoptar una de ocho geometrías canónicas. La disección de cada 3-variedad guarda cierto parecido con la descomposición de un número en producto de sus divisores primos.

El primero en conjeturar este esquema de clasificación fue Thurston, hacia el final de los años setenta. Thurston y otros demostraron grandes porciones de la conjetura, pero ciertos aspectos cruciales, de los que dependía el sistema entero, quedaron sin prueba, entre ellos la parte en que figuraba la conjetura de Poincaré. ¿Era única la 3-esfera? Sólo los artículos de Perelman nos han proporcionado la respuesta de esta pregunta y la conclusión del programa de Thurston.

¿De qué modo podríamos tratar de geometrizar una variedad, es decir, conferir a toda ella una curvatura uniforme? Un procedimiento podría consistir en partir de una cierta geometría arbitraria, tal vez una especie de ovoide con diversas jorobas o abolladuras, y proceder después a alisar las irregularidades. Hamilton dio comienzo a un tal programa de análisis a principio del decenio de 1990, sirviéndose de la ecuación de flujo de Ricci (en recuerdo del matemático Gregorio Ricci-Curbastro), que presenta ciertas semejanzas con la que gobierna el flujo de calor. En un cuerpo donde haya puntos calientes y puntos fríos, el calor fluye de las partes calientes hacia las frías hasta que la temperatura es la misma en todo él. La ecuación de flujo de Ricci ejerce un efecto similar sobre la curvatura y va modelando la variedad hasta eliminar los bultos y hundimientos. Un


3. POINCARE (*sentado, conversando con Marie Curie*) asistió a la primera Conferencia Solvay de Física, que se celebró en Bruselas en octubre de 1911. En pie, tras ellos, vemos a Ernest Rutherford, Heike Kamerling Onnes (que había descubierto la superconducción ese mismo año) y Albert Einstein. Es posible que ésta fuese la única ocasión en que Einstein y Poincaré se encontrasen. Poincaré fallecería nueve meses después.



HULTON-DEUTSCH COLLECTION/*CORBIS*

huevo, por ejemplo, iría adoptando gradualmente la forma esférica.

El análisis de Hamilton sufrió un serio tropiezo: en determinadas situaciones, el flujo de Ricci provocaría que la variedad experimentase una estrangulación y se escindiera. (Es éste uno de los aspectos en los que el flujo de Ricci se diferencia del flujo del calor. Los lugares de estrangulación equivaldrían a puntos que adquiriesen una temperatura infinita.) Se daba un caso así cuando la variedad tenía la forma de unas pesas de gimnasia, dos esferas conectadas por un tubo estrecho. Las esferas irían creciendo, extrayendo material del tubo, que acabaría quedando reducido a un punto en su parte central (*véase el recuadro* "Tratamiento de las singularidades"). Se presentaba otra situación anómala cuando sobresalía de la variedad un vástago delgado: el flujo de Ricci podría provocar una anomalía llamada "singularidad en cigarro". Cuando una variedad se escinde de este modo se dice que es singular, que no es una auténtica variedad tridimensional. En las verdaderas variedades tridimensionales todos los puntos están envueltos en un entorno que se comporta igual que una pequeña región del espacio tridimensional ordinario. Tal propiedad deja de cumplirse en los puntos de estrangulamiento. Ha sido necesario esperar a que Perelman acertase con la forma de obviar este obstáculo.

Perelman se trasladó a Estados Unidos en 1992 para realizar estudios posdoctorales. Pasó sendos semestres en la Universidad de Nueva York y en Stony Brook, y después dos años más en California, en Berkeley. Rápidamente adquirió renombre al demostrar muchos resultados importantes y profundos de una determinada rama de la geometría. Le fue concedido un premio de la Sociedad Matemática Europea (que no aceptó) y se le invitó —gran distinción profesional— a disertar ante el Congreso Internacional de Matemáticos (esta vez no declinó la invitación). En la primavera de 1995 le fueron ofrecidos diversos puestos en buen número de prestigiosas facultades de matemática, pero los rechazó y regresó a su hogar en San Petersburgo. "Su mentalidad es profundamente rusa", comentó uno de sus colegas estadounidenses. "No es nada materialista."

De regreso en San Petersburgo, los matemáticos casi lo perdieron de vista. Los únicos signos de actividad, tras muchos años, fueron las raras ocasiones en que se dirigió por correo electrónico a antiguos colegas para advertirles, por ejemplo, de errores en artículos que habían dado a conocer por Internet. Tales contactos eran los únicos signos de que seguía practicando las matemáticas. Los mensajes electrónicos de quienes se interesaban por sus actividades quedaron sin respuesta.

Por fin, en las postrimerías de 2002, envió a varias personas un mensaje electrónico que llamaba su atención sobre el artículo que había colgado en el servidor de matemáticas: tan sólo una breve nota, típica de él, para decirles que podrían encontrarlo de interés. Con tan modesto anuncio daba a conocer la primera fase de su ataque a la conjetura de Poincaré. Perelman reconocía en una nota a pie de página de esa prepublicación, aparte de su pertenencia al Instituto Steklov, que había estado viviendo del dinero ahorrado en su período posdoctoral en EE.UU.

En el artículo, añadía un término nuevo a la ecuación de flujo de Ricci. La ecuación modificada no eliminaba las dificultades planteadas por las singularidades; le permitía, en cambio, llevar su análisis mucho más lejos. En el caso de las singularidades de las pesas puso de manifiesto la posibilidad de una "solución quirúrgica": se amputa el delgado tubo a cada lado de la incipiente estrangulación y se tapona el tubo abierto de cada una de las esferas de la mancuerna con un casquete esférico. Se podía continuar ahora con el flujo de Ricci en la variedad quirúrgicamente modificada hasta el siguiente punto

de estrangulación, al que se aplicaría el mismo procedimiento. Perelman demostró también que no se daban singularidades en cigarro. Así, cualquier 3-variedad podría reducirse a una colección de piezas, provistas cada una de una geometría uniforme.

Cuando se aplican el flujo de Ricci y el procedimiento quirúrgico a todas las 3-variedades posibles, cualquier variedad que sea "igual de simple" que una 3-esfera (con vocabulario técnico, que tenga la misma homotopía que una 3-esfera) acaba necesariamente con la misma geometría uniforme que una 3-esfera. Este resultado significa que, topológicamente, la variedad en cuestión *es* una 3-esfera. Dicho con otras palabras: la 3-esfera es única.

Aparte de la demostración de la conjetura de Poincaré, la investigación de Perelman es importante por las innovadoras técnicas de análisis que ha introducido. Los matemáticos están ya difundiendo por la Red artículos que se fundan en el trabajo de Perelman, o que aplican sus técnicas a otros problemas. Se trata, además, de problemas matemáticos que tienen curiosas conexiones con la física. El flujo de Ricci utilizado por Hamilton y Perelman está emparentado con el llamado grupo de renormalización, que especifica de qué modo cambia la intensidad de las interacciones en función de la energía de colisión. Por ejemplo, a energías pequeñas, la interacción electromagnética tiene una intensidad caracterizada por el número 0,0073 (aproximadamente igual a 1/137). Cuando dos electrones colisionan frontalmente a velocidades cercanas a la de la luz, la intensidad se acerca más a 0,0078.

El incremento de la energía de colisión equivale a estudiar la fuerza a una escala de distancias más pequeña. El grupo de renormalización es, pues, algo así como un visor que amplía o reduce, según convenga estudiar un proceso con detalle más fino o más grueso. El flujo de Ricci es, análogamente, como un microscopio que examina una variedad con una ampliación dada. Los resaltes y hundimientos visibles a una cierta amplificación dejan de serlo a menor ampliación. Los físicos confían en que a la escala de 10^{-35} metros, la llamada longitud de Planck, el espacio en que vivimos ofrecerá un aspecto muy diferente, algo así como una "espuma" con muchos aros y asas y otras estructuras topológicas [*véase* "Atomos del espacio y del tiempo", por Lee Smolin; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2004]. Las matemáticas que describen el cambio de las fuerzas físicas son muy similares a las que describen la geometrización de una variedad.

Otra de las vinculaciones con la física consiste en que las ecuaciones de la relatividad general, que describen la gravitación y la estructura a gran escala del universo, están íntimamente ligadas a la ecuación de flujo de Ricci. Por si fuera poco, el término añadido por Perelman al flujo básico utilizado por Hamilton aparece también en la teoría de cuerdas, que es una teoría cuántica de la gravitación. Está por ver si las técnicas de Hamilton revelarán información nueva e interesante sobre la relatividad general o sobre la teoría de cuerdas. En tal caso, Perelman no sólo nos habrá hecho saber las configuraciones que pueden adoptar los espacios abstractos, sino también la forma del espacio particular y concreto en que vivimos.

Bibliografía complementaria

THE POINCARÉ CONJECTURE 99 YEARS LATER: A PROGRESS REPORT. John W. Milnor, febrero de 2003. Disponible en www.math.sunysb.edu/~jack/PREPRINTS/polproof.pdf

JULES HENRI POINCARÉ (biografía). Octubre de 2003. Disponible en www.groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Poincaré.html

MILLENNIUM PROBLEMS. The Clay Mathematics Institute: www.claymath.org/millennium/

NOTES AND COMMENTARY ON PERELMAN'S RICCI FLOW PAPERS. Dirigido por Bruce Kleiner y John Lott. Disponible en www.math.lsa.umich.edu/research/ricciflow/perelman.html

TOPOLOGY. Eric W. Weisstein en *Mathworld-A Wolfram Resource*. Disponible en mathworld.wolfram.com/Topology.html

Origen de los celos

A la luz de la investigación reciente, las diferencias sexuales que la psicología evolutiva atribuye a este sentimiento ancestral se desvanecen: hombres y mujeres parecen sufrir los celos por igual

Christine R. Harris

No era amor lo único que se respiraba el día de San Valentín de 2003: en aquella misma fecha, un jurado de Texas declaraba a Clara Harris culpable de haber asesinado a su marido "en un arrebato de pasión". Tras descubrirlo en un hotel con la amante, decidió atropellarlo, haciendo pasar varias veces el coche sobre su cuerpo. Mientras otros seguían celebrando el día de los enamorados, la "asesina del Mercedes" era condenada a 20 años de cárcel.

Harris no fue la primera mujer acusada de cometer asesinato por un ataque de celos. Según varios estudios, la celotipia figura entre las tres principales causas de homicidio intencionado con móvil conocido; las otras dos son la violencia de una pelea y la comisión de un delito. Esta cegadora emoción ha sido fuente de inspiración para la poesía, la novela, el teatro, la ópera y el arte de todas las épocas. Hoy centra la atención también de los psicólogos, que, en su afán de hallar una explicación científica, la han abordado desde diversos enfoques teóricos.

Los primeros estudios se centraron en la interpretación freudiana. Su influencia todavía se advierte en la bibliografía psiquiátrica. Pero, igual que en otros ámbitos de la psicología, la investigación reciente ha tomado un rumbo distinto. Ha llegado el momento de ahondar en la naturaleza y el origen de esta dolorosa y peligrosa faceta del amor.

La mayoría de nosotros conocemos los celos porque los hemos sufrido en nuestra propia piel. ¿Quién no se ha mostrado celoso cuando, por ejemplo, algún rival ha amenazado la estabilidad de una relación amorosa? Dada la intrincada naturaleza de las relaciones sociales, cualquier teoría que pretenda describir los celos deberá entrañar cierta complejidad. De ahí que la investigación se centre en la influencia de los factores sociales y cognitivos sobre la incidencia y expresión de este sentimiento. Algunos psicólogos han explorado los factores culturales; han descubierto que son más frecuentes en las culturas que confieren importancia social al matrimonio y sólo aprueban el placer sexual entre cónyuges, así como en las que valoran sobremanera la propiedad privada. Otros han intentado explicar por qué unos individuos se muestran celosos ante la más mínima provocación y otros, en cambio, parecen menos susceptibles. (En estos estudios se han considerado elementos muy diversos, desde la personalidad hasta el apego a los progenitores o quién obtiene mayor beneficio de la relación.)

Veamos una de las teorías que centran el debate sobre el origen de los celos. Se desarrolló en los años noventa del siglo pasado, coincidente con un nuevo enfoque de la aplicación de la doctrina darwinista de la evolución al comportamiento humano. De acuerdo con el nuevo planteamiento, los celos habrían proporcionado una ventaja adaptativa a nuestros ancestros, sin distinción de sexo; en cambio, las presiones selectivas que éstos debían superar para sobrevivir y reproducirse en aquel entorno resultaban asimétricas (no eran las mismas para ellos que para ellas). De ahí que los celos, así como muchas de las emociones asociadas a la cópula, llegaran a manifestarse de forma distinta en varones y mujeres. La hipótesis de que los celos evolucionaron hasta inscribirse en los circuitos cerebrales, originando un "módulo innato" con disparadores primarios específicos para cada sexo, constituye una de las más célebres aportaciones de la psicología de cuño evolucionista.

Sigue abierto el debate en torno a esa hipótesis. Se han ofrecido nuevas pruebas que cuestionan la realidad de una existencia de diferencias fundamentales en los celos por razón de sexo. Tras analizar dichos datos a la luz de otras teorías, me parece a mí que la explicación evolucionista esgrimida cae en sutilezas y



HARGRETT RARE BOOK AND MANUSCRIPT LIBRARY, *Univ. de Georgia/American Scientist*

1. POPULARES EN LA LITERATURA, el arte, la música y el teatro de todos los tiempos, los celos centran hoy la atención de los psicólogos. Ya en la mitología griega, encontramos un ejemplo arquetípico de la celotipia femenina: la venganza de Hera, esposa de Zeus. Habiendo el mujeriego rey de los dioses preñado a Semele, Hera consiguió, mediante una serie de engaños, que su rival muriera abrasada en un incendio. Dioniso (Baco) nacía mientras su madre perecía entre las llamas. En este grabado de principios del siglo XIX, *El nacimiento de Baco,* obra de Jean-Baptiste Patas, que tomó por modelo un cuadro pintado en el siglo XVI por Giulio Romano, Hera aparece observando la escena desde lo alto. Los psicólogos evolucionistas sostienen que los celos femeninos se activan ante la infidelidad emocional del cónyuge, mientras que el arrebato de celos de los varones emerge con mayor intensidad ante la infidelidad sexual. Pero las pruebas que respaldan esta hipótesis resultan, cuando menos, ambivalentes.

complejidades excesivas. Admitamos que se trata de una emoción innata y adaptativa. Su manifestación, sin embargo, halla mejor encaje interpretativo en el marco de la sociología del conocimiento y de la teoría del desarrollo que en un contexto de estrategias de cópula de nuestros antepasados.

Teoría del módulo innato

Como he mencionado arriba, los psicólogos evolucionistas tratan de explicar las peculiaridades de la conducta humana mediante la presión de selección que operó sobre nuestros antepasados del Pleistoceno: presión que determinó qué progenie sobrevivía o no. Sostienen que las emociones que hoy se hallan inscritas en nuestros circuitos cerebrales quizá no aumenten la capacidad adaptativa (la probabilidad de supervivencia de nuestros genes); pero en el entorno de nuestros antepasados, en cambio, constituían una clara ventaja evolutiva. Semejante argumentación se ha empleado para explicar las náuseas y la depresión asociadas al embarazo, amén de otros fenómenos de nuestra naturaleza.

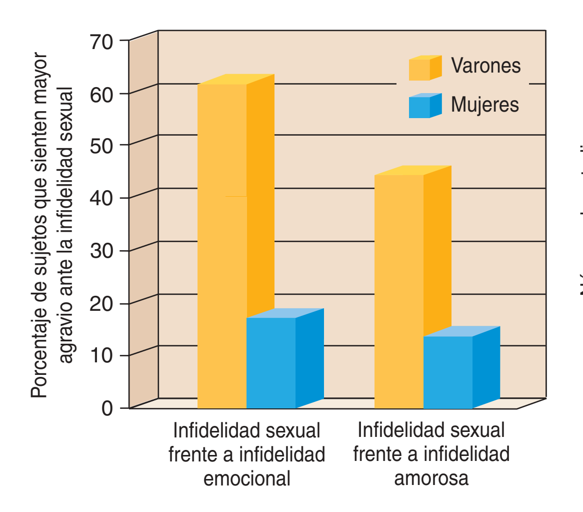
Según David Buss, de la Universidad de Texas en Austin, y otros psicólogos evolucionistas, un conjunto de circuitos cerebrales guían nuestra reacción emocional ante las amenazas que ponen en peligro las relaciones amorosas. Aducen que tal módulo cognitivo-emocional confiere al varón una predisposición innata a la respuesta celosa ante una infidelidad *sexual*; en las mujeres, esa misma red predispone a una reacción similar ante la infidelidad *emocional*.

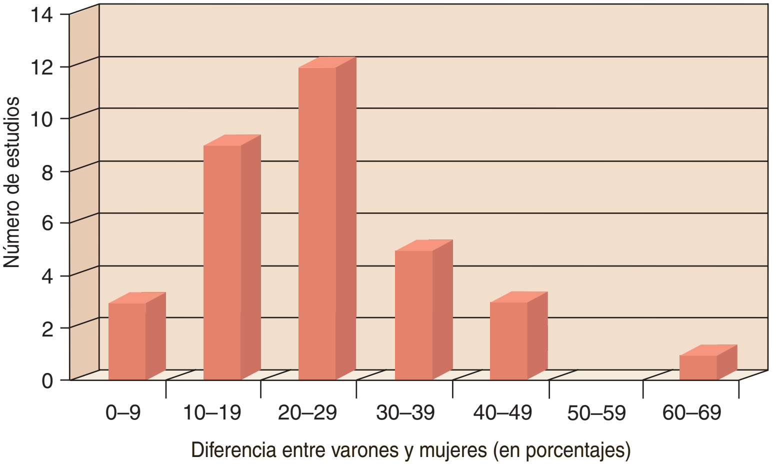
Atribuyen esta especificidad sexual en la respuesta a los distintos peligros que debieron afrontar para adaptarse y sobrevivir en el Pleistoceno. Según la teoría de la selección natural, las mutaciones que aumentan la adaptabilidad se premian con la supervivencia: pasan a las generaciones siguientes, transmitidas por sus afortunados portadores.

Nuestros primeros precursores hubieron de hacer frente a la amenaza darwinista de la infidelidad. Al ser interna la fecundación del óvulo, no existe plena garantía de paternidad. En el caso de que fuera otro el que fecundase a la mujer, el burlado gastaría sus escasos recursos en criar a una prole ajena, con la consiguiente frustración de su eficiencia reproductora. De ahí que la selección natural configurase el cerebro masculino para responder a la infidelidad sexual con una intensa celotipia, una emoción que le prestaría apoyo contra el engaño.

Su compañera femenina, en cambio, no corría ese peligro. Sólo ella podía ser la madre de sus hijos. No sufría ninguna presión selectiva que le indujera a responder ante la infidelidad sexual. Pero sí le convenía preocuparse por si su pareja se fijaba en otra mujer, ante el riesgo de que desviase sus recursos hacia ésta y la progenie que le diera. Dado que los hijos requieren años de atención, los recursos disponibles resultaban cruciales para la eficacia adaptativa de la mujer. Por tanto, de acuerdo con ese planteamiento, las mujeres desarrollaron un módulo innato particularmente sensible a la infidelidad emocional (partiendo del supuesto de que los hombres invierten sus recursos en las mujeres a las que aman).

Esta hipótesis evolutiva ha gozado de notable difusión a extra-

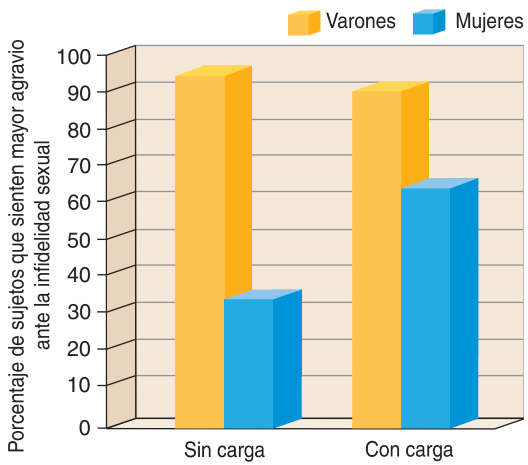




2. LOS CELOS SE HAN ESTUDIADO mediante pruebas de elección forzada. En ellas, los voluntarios describen su reacción ante dos situaciones imaginarias distintas en las que su cónyuge les es infiel. Podría suponerse que la infidelidad sexual dispara la celotipia en los hombres, porque los celos beneficiaban al hombre ancestral que veía amenazada por el engaño su capacidad adaptativa heredable. La mujer, en cambio, habría respondido con más fuerza a la infidelidad emocional, ya que ésta ponía en peligro los recursos que necesitaba para criar a la descendencia. En 1992, David Buss y su equipo presentaron un test a 202 universitarios en que debían exponer sus reacciones ante infidelidades imaginarias que implicaban relaciones sexuales, "apego emocional profundo" y "enamoramiento". Sus respuestas encajaron con el patrón predicho (*izquierda*). Desde entonces, se han publicado numerosos estudios similares. En éstos, la diferencia entre las proporciones de hombres y mujeres heterosexuales que eligen la infidelidad sexual como el mayor disparador de celos oscila entre el 8 por ciento (en un estudio con adultos austríacos) y el 69 por ciento (en una muestra de universitarios estadounidenses) (*derecha*). Sólo en un ensayo se observó una tendencia inversa: en una muestra de homosexuales holandeses, lesbianas y varones ("gays"), la infidelidad sexual preocupó más a las lesbianas que a los hombres.

American Scientist

3. PARA AVERIGUAR SI LAS DIFERENCIAS sexuales representadas en la figura 2 reflejaban la operación de módulos innatos (circuitos cerebrales) masculinos y femeninos, David DeSteno y su grupo impusieron a los probandos de su estudio una carga cognitiva: mientras respondían a las preguntas, éstos debían recordar una serie de siete cifras. Tal distracción no repercutió en las respuestas de los hombres; las mujeres, en cambio, mostraron una mayor tendencia a escoger la infidelidad sexual como la causante de una celotipia más intensa. Este desplazamiento de la respuesta induce a pensar que las reacciones de las mujeres tal vez estén condicionadas por su percepción de la infidelidad o sigan estrategias de autopresentación (la tendencia natural que nos impulsa a responder de acuerdo con la imagen que queremos dar de nosotros mismos).



muros de los círculos académicos. Demostraremos aquí que no es la única explicación de los celos coherente con la teoría de la evolución por selección natural.

El método de elección forzada

La teoría del módulo innato ha ganado numerosos adeptos entre los psicólogos. Ello se debe, en parte, a una profusión de estudios basados en autoinformes de alumnos universitarios. Se les pide a los voluntarios del ensayo que imaginen una relación amorosa en la que su pareja mantiene relaciones sexuales con otra persona o se enamora de ésta; luego deben señalar cuál de estos dos tipos de infidelidad les provocaría mayor disgusto.

Este método de elección forzada (en el que el sujeto debe escoger una de dos alternativas igualmente probables) fue diseñado por Buss y sus compañeros en 1992. Desde entonces se ha aplicado en numerosos trabajos. En los EE.UU., los resultados muestran una notable diferencia entre ambos sexos: en su mayoría (un 70 por ciento o más), las mujeres responden que les dolería más la infidelidad emocional, mientras que un gran número de varones (entre el 40 y el 60 por ciento) creen que sería peor la sexual.

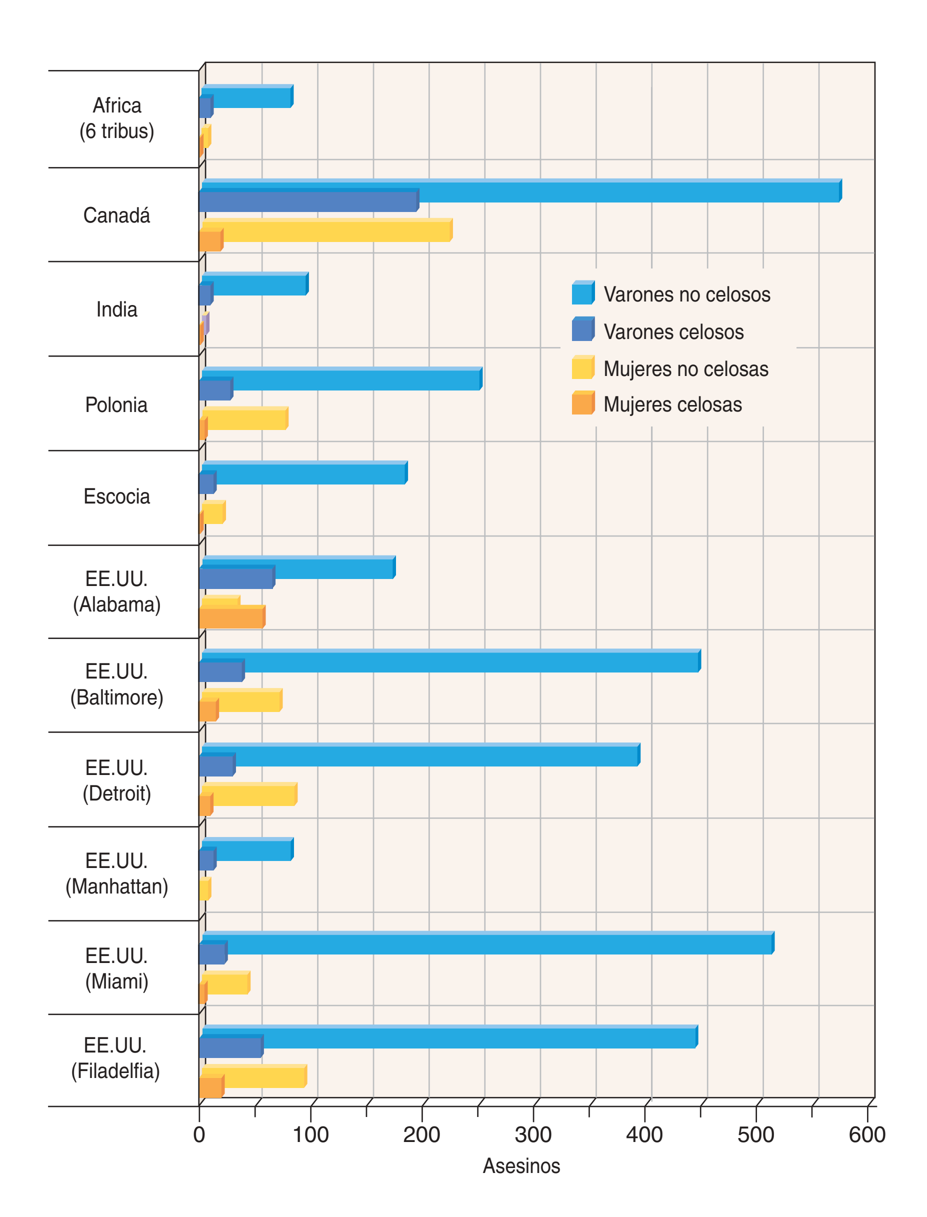
En fecha reciente, dirigí un estudio de meta-análisis, que integraba los resultados de varios trabajos de este tipo y los sometía a criba. Aparecieron diferencias sexuales tajantes y moderadas; tienden, sin embargo, a disminuir con la edad o en muestras que incluyen homosexuales. Tales diferencias se detectan también en muestras procedentes de otros países. No obstante, la proporción de varones europeos y asiáticos que eligen la infidelidad sexual como la peor opción resulta mucho menor que la estadounidense (a menudo sólo del 25 al 30 por ciento). Se trata de un efecto cultural, de magnitud comparable a la del efecto dependiente del sexo.

En mi opinión, las diferencias sexuales en las respuestas del método de elección forzada no reflejan forzosamente la existencia de módulos innatos. Podrían responder a las distintas percepciones que varones y mujeres tienen de la infidelidad y todos los disgustos que ésta acarrea. Según la hipótesis del "dos por uno", ellos tienden a pensar que la infidelidad sexual merece mayor preocupación porque infieren que si una mujer yace con otro varón resulta verosímil que también esté enamorada de él. Ellas, en cambio, tienden a creer que los hombres pueden copular con una mujer sin estar enamorados; por consiguiente, la infidelidad sexual no implica necesariamente infidelidad emocional. Razonan que el hombre que se enamore de otra mujer, acabará por mantener relaciones sexuales con ella. Por eso mismo, eligen la infidelidad emocional como la peor.

Con todo, las pruebas que respaldan esta teoría resultan confusas: unos expertos la han confirmado, pero otros no han hallado indicios que la apoyaran. Aunque tales percepciones intervengan en las diferencias sexuales de los celos, hemos, pues, de concluir que no agotan la explicación.

El grupo dirigido por David De Steno, de la Universidad del Nordeste, sigue otro enfoque. De ser cierta la hipótesis del módulo innato con especificidad sexual, adujeron, bastaría con impedir que los sujetos meditaran su elección para aumentar las discrepancias en torno a los celos vinculadas con el sexo, polarizando así las reacciones de varones y mujeres. Con este propósito, añadieron al estudio una carga cognitiva: mientras respondían a la pregunta, los voluntarios debían recordar una serie de siete cifras. Los varones no cambiaron de opinión. Las mujeres, por el contrario, mostraron ahora una mayor tendencia a conceder primacía a la infidelidad sexual. Esta modificación de los resultados sugiere que las respuestas de las mujeres tal vez estén condicionadas por su percepción de la infidelidad (distinta de la percepción de los hombres, según la teoría del "dos por uno") o sigan estrategias de autopresentación (la tendencia natural que nos impulsa a responder de acuerdo con la imagen que queremos dar de nosotros mismos).

Otros investigadores han preferido separar en su trabajo las circunstancias que giran en torno a la infidelidad sexual de las que rodean a una situación de infidelidad emocional. La celotipia desencadenada no se mide ahora por opiniones dicotómicas; las reacciones evocadas se ajustan a una escala graduada. La nueva presentación tiende a abolir las diferencias sexuales; en alguna ocasión, incluso aparecen en la dirección opuesta (mujeres que reaccionan peor ante la infidelidad sexual). En general, pues, el método de elección forzada revela algún tipo de diferencia sexual, pero no sirve para distinguir si su origen se



4. EL NÚMERO DE HOMBRES que asesinan por celos supera al de mujeres. Debemos matizar, sin embargo, que los hombres cometen todo tipo de crímenes violentos con más frecuencia que las mujeres. En busca de pruebas que reflejaran algún tipo de diferencia sexual, la autora realizó un meta-análisis de 20 estudios sobre las causas de asesinato en diversas culturas. Se muestran aquí las distintas cifras de homicidios que por celos cometieron unos y otras. No se detectó ninguna diferencia general debida al sexo. Con otras palabras, los estudios sobre asesinatos no proporcionan prueba alguna de la existencia de un módulo innato con especificidad sexual.

encuentra en una predisposición innata o en un proceso cognitivo más complejo.

Medidas fisiológicas

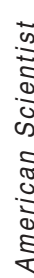
¿No podríamos abordar la cuestión de forma objetiva y evitar la subjetividad de los autoinformes? Con ese propósito, Buss y su grupo se aprestaron a medir la actividad del sistema nervioso autónomo. En 1992, registraron la activación fisiológica de los voluntarios mientras éstos se iban imaginando ser víctimas de diferentes tipos de infidelidad. En los universitarios varones, las respuestas cardíaca y electrodérmica resultaban superiores cuando se imaginaban a su hipotética novia yaciendo con otro que cuando la imaginaban enamorada de otro. En las universitarias sucedía lo contrario. Estos resultados se han considerado una prueba de que varones y mujeres sienten los celos de forma distinta.

Sin embargo, el arrebato fisiológico, su reactividad, traduce múltiples emociones, muy dispares; por eso los detectores de mentiras no se consideran fiables del todo. El aumento de la presión arterial, la aceleración del ritmo cardíaco y la sudoración generalizada acompañan a la ansiedad, el temor e incluso la excitación sexual, que también puede darse. En consecuencia, puesto que los probandos sólo son víctimas de una infidelidad imaginaria, pudiera ocurrir que la intensificación de la reactividad reflejara otras emociones o estados cognitivos, no sólo los celos.

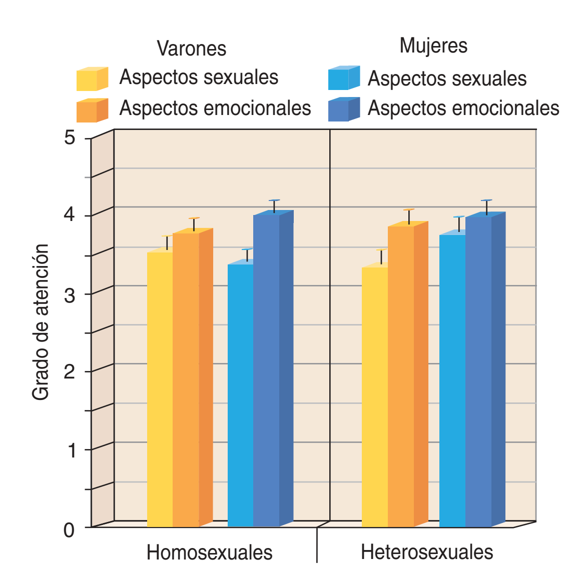
Esa posibilidad ha centrado nuestra investigación reciente, de la Universidad de California en San Diego, y la acometida en el laboratorio de James Grice, de la Universidad meridional de Illinois. En los experimentos realizados en nuestro laboratorio, se comprobó que la reactividad fisiológica de los varones mostraba el mismo grado de aumento cuando se imaginaban *a sí mismos* yaciendo con su pareja que cuando el que tenía relaciones sexuales (imaginarias) con su novia era otro. De ello cabe inferir que la alteración fisiológica de los varones refleja como mínimo el arrebato sexual, si no es acaso la razón última.

Este trabajo tampoco logró apoyar la hipótesis de que las mujeres, en general, se muestran más celosas ante una infidelidad emocional. Al parecer, sus respuestas dependían de la experiencia sexual; las que habían mantenido relaciones sexuales mostraban mayor reactividad a la infidelidad sexual imaginaria que a la infidelidad emocional imaginaria. En otras palabras, su celotipia respondía a un patrón similar al masculino.

En el mejor de los casos, los datos psicofisiológicos ofrecen una respuesta ambivalente a las cuestiones que plantea la hipótesis del módulo innato (quizá porque las medidas no logran discernir entre las emociones). En el peor de los casos, dan un peso excesivo al sufrimiento, de forma que la reacción ante la infidelidad sexual parece superar a la emocional en hom-



5. HOMBRES Y MUJERES responden a la infidelidad real (no imaginaria) de forma similar. En cierto experimento de la autora, ambos sexos se mostraban más preocupados por los aspectos emocionales de las aventuras amorosas de su cónyuge que por los sexuales.



bres y mujeres (por lo menos cuando se examina a individuos con experiencia en esas relaciones). Por si fuera poco, eludir las deficiencias de los estudios fisiológicos basados en experiencias imaginarias resulta, en la práctica, imposible; para ello deberíamos solicitar a un conjunto de sujetos, escogidos al azar, que experimentaran una infidelidad real, para registrar luego cómo reaccionarían al enterarse del engaño sufrido.

Celos, asesinato y violencia

Algunos sostienen que la prueba más fuerte de la existencia del módulo innato con especificidad sexual se halla en los patrones de conducta violenta que se observan en diferentes culturas. En 1982, Martin Daly y Margo Wilson, de la Universidad McMaster, revisaron varios estudios sobre causas de homicidio. Resultó que el móvil de los celos predominaba entre los varones homicidas. Con todo, cabe considerar que los hombres cometen toda clase de delitos violentos, incluido el asesinato, en mayor cuantía que las mujeres. Por tanto, comparar cifras absolutas de homicidios podría resultar engañoso. En este sentido, dos nuevos trabajos han evaluado la relación entre celotipia y homicidio, introduciendo en la investigación las diferencias en la tasa total de crímenes violentos; al añadir tal ponderación, se obtienen resultados harto distintos.

Abordé hace poco los móviles de los asesinatos en 20 muestras que incluían sujetos procedentes de culturas diversas (225 homicidios en total). No hallé ninguna diferencia atribuible al sexo. Anteriormente, Richard B. Felson, de la Universidad estatal de Nueva York en Albany, examinó 2060 asesinatos registrados en una base de datos de 33 grandes condados urbanos estadounidenses; a tenor de los datos, la probabilidad de que las mujeres asesinaran por celos doblaba la asignada a los varones.

En cabal ajuste con los meta-análisis de los trabajos sobre la violencia, cabe mencionar otros estudios recientes, centrados en las reacciones de sujetos adultos ante una infidelidad real. En una muestra de individuos heterosexuales y homosexuales de distintas edades, que habían sido víctimas de una infidelidad, mujeres y hombres mostraron mayor preocupación por los aspectos emocionales del engaño de su pareja que por los sexuales. Entre estudiantes universitarios tampoco se ha encontrado diferencia sexual alguna.

Celos enfermizos

En apoyo de la hipótesis del módulo innato se aducen los casos clínicos de "celotipia mórbida". Quienes padecen este trastorno viven convencidos de que su pareja les es infiel, pura ilusión en la mayoría de los casos. Sufren ansiedad y depresión y sienten la necesidad de espiar a su cónyuge. En ocasiones, recurren a la agresión y no falta quien ha conseguido poner entre rejas a su pareja.

En el total de los cinco estudios que se han publicado sobre esta patología, aparecen 228 varones (64 por ciento) y 127 mujeres (36 por ciento) enfermos diagnosticados. En un análisis anterior, Daly, Wilson y Suzanne J. Weghorst, de la Universidad de Washington, interpretaron que tal preponderancia de pacientes masculinos indicaba que los hombres cuentan con un mecanismo de celotipia sexual ausente en las mujeres.

Si aceptamos que la superioridad de los casos masculinos (que viene a ser de 65 sobre 35) constituye un reflejo genuino de la incidencia de la patología y que las obsesiones de los varones se centran sobre la traición sexual, ¿podemos extraer alguna conclusión? Antes de continuar, conviene saber que la relación de hombres y mujeres que sufren un determinado trastorno mental no suele ser de 1 sobre 1; ellos las superan en numerosos casos, desde el consumo de drogas hasta el autismo.

Según Elaine Barrett y Gordon Parker, psiquiatras australianos de la Universidad de Nueva Gales del Sur, la celotipia mórbida constituye, con frecuencia, una forma del trastorno obsesivo-compulsivo (DOC). De hecho, varios grupos de psicólogos clínicos afirman haber tratado con éxito la celotipia mórbida con fluoxetina, un inhibidor de la reabsorción de la serotonina, indicado en el tratamiento del DOC. Por su parte, Dan J. Stein, Eric Hollander y Stephen C. Josephson, de la Universidad de Columbia, hallaron semejanzas notables entre la conducta de los pacientes con celotipia obsesiva y la de los que sufren un trastorno obsesivo-compulsivo.

La incidencia total del DOC viene a coincidir en varones y mujeres, aunque algunos estudios hablan de una ligera mayoría masculina. Se acepta, en cambio, que el DOC con obsesiones sexuales se manifiesta con mayor frecuencia en ellos que en ellas. En este contexto, Patrizia Lensi y su grupo de la Universidad de Pisa encontraron que, en una amplia muestra de pacientes que ingresaron (consecutivamente) en un hospital psiquiátrico italiano para evaluar sus trastornos obsesivo-compulsivos, los sujetos que manifestaban dichos síntomas eran, en su mayoría, varones, en una proporción de más de dos a una.

American Scientist

Si la celotipia mórbida constituye una manifestación del DOC y los hombres son propensos a sufrir ese trastorno acompañándolo de obsesiones sexuales, resulta cuando menos cuestionable extraer conclusiones sobre la psicología masculina a partir de la incidencia de tal patología. Los síntomas que presentan los hombres afectados de DOC podrían reflejar las diferencias entre varones y mujeres de la población general; o tal vez no. La obsesión por la exactitud y la simetría constituye otro de los síntomas del DOC que aparece con mayor frecuencia en hombres que en mujeres (en una proporción de tres a una); pero ello no significa que las mujeres aprecien menos la simetría o la exactitud.

En resumidas cuentas, cuando abandonamos los estudios de laboratorio y tratamos con quienes sufren una infidelidad real, quienes movidos por sus celos cometen un crimen o quienes viven obsesionados por la posibilidad de que su pareja les engañe, no detectamos ninguna diferencia entre varones y mujeres que respalde la hipótesis del módulo innato y específico de cada sexo. Al descubrir que su pareja les engaña, ellas y ellos se muestran más preocupados por los aspectos emocionales de la infidelidad que por los sexuales (en contraposición a lo que refleja la observación fisiológica). Si bien es cierto que los hombres desarrollan un mayor grado de celotipia violenta u obsesiva, también lo es que superan a las mujeres en cuanto a la tendencia general a la violencia y a la obsesión sexual.

Celos y selección natural

A primera vista, los principios básicos de la teoría del módulo innato —según la cual, la distinta presión de selección sobre varones y mujeres dio origen a diferentes mecanismos anexos a la cópula— resultan incuestionables. Brindan una excelente oportunidad para vincular la psicología humana a la fuerza motriz que guía el diseño de todas las formas de vida terrestres, a saber, la evolución por selección natural. A mayor abundamiento, los datos recogidos en los cuestionarios abonaban la tesis del vínculo.

Pero la revisión precedente nos muestra que las pruebas de la existencia de circuitos cerebrales, distintos en cada sexo, que modulen los celos pierden traza en cuanto se pasa de jóvenes universitarios que deben escoger entre opciones imaginarias a adultos que sufren una infidelidad real. ¿Cómo se justifican entonces las diferencias sexuales en los celos? Repasemos otras propuestas alternativas; en mi opinión, abren el camino a nuevas investigaciones.

En primer lugar, cabe advertir que nos hallamos muy lejos de conocer el ambiente social o cultural del Pleistoceno. Además, la biología podría ser incapaz de inferir, por sí sola, los factores que amenazaban a la eficacia adaptativa de nuestros antepasados. Quizá las tasas de infidelidad entre los primeros homínidos no fuesen tan altas como han supuesto los psicólogos evolucionistas; al vivir en pequeños grupos, el engaño quizá resultaba más difícil que en nuestras sociedades urbanas. Tal vez los machos no invertían tantos recursos en la progenie como para que las consecuencias de la infidelidad encerrasen la gravedad que les concede la psicología evolucionista. En su análisis de las sociedades cazadoras-recolectoras que hoy persisten, Wendy Wood, de la Universidad Duke, y Alice Eagly, de la Universidad del Noroeste, observaron que la distinta contribución de varones y mujeres a la subsistencia del grupo dependía en grado sumo de la cultura; en algunos casos, son ellas las que más aportan. Ante tal variabilidad, inferir las condiciones sociales del Pleistoceno a partir de los datos contemporáneos resulta arriesgado.

En segundo lugar, aun suponiendo que nuestros antepasados pagaran un alto precio por ser víctimas de la infidelidad y de la consiguiente pérdida de recursos, la evolución podría haber superado este obstáculo mediante una estrategia distinta de la que sugiere la teoría del módulo innato. De entrada, centrar la atención en la traición sexual o emocional de la pareja quizá no constituya una forma eficaz de *impedir* la infidelidad. De acuerdo con los proponentes de la teoría, el yacimiento *per se* desencadenaría el mecanismo de la celotipia en el varón; en la mujer, se activaría ante el hecho del enamoramiento. Buss y otros han observado que los sujetos aqueja-



6. ¿SERVIRAN LOS ESTUDIOS CON PRIMATES para ahondar en la naturaleza de los celos humanos? El babuino macho vigila y protege a su pareja; en época de celo, la sigue por todas partes para evitar que copule con otros. Pero la biología humana presenta rasgos distintivos, únicos, por no hablar de la variabilidad que encontramos en la conducta reproductiva de los primates; los gibones, por ejemplo, son los únicos monos monógamos.

CORTESIA DE SUSAN ALBERTS, *Universidad de Duke (fotografía)/American Scientist*



SYBIL HART, *Human Development and Family Studies/American Scientist*

7. LA RIVALIDAD ENTRE HERMANOS puede proporcionar indicios sobre el origen de los celos. Sybil Hart observó que los bebés de sólo seis meses de edad mostraban expresiones faciales negativas si su madre jugueteaba con un muñeco de aspecto de niño. Tal reacción sugiere que un infante puede desarrollar la celotipia, al menos en una forma primitiva, sin la necesidad de ningún proceso cognitivo complejo. La autora sostiene que una teoría socio-cognitiva podría unificar la celotipia sexual adulta con la sensación arcaica de miedo que los bebés expresan. Con toda probabilidad, los celos innatos, o inscritos en los circuitos cerebrales, desempeñan una función adaptativa en las relaciones de pareja; pero también pueden responder a un mecanismo psicológico más general, que en los adultos depende de las experiencias personales y la cultura.

dos de celos detectan, con notable acierto, las señales de infidelidad (sus sospechas suelen confirmarse). Entonces, si la alarma que disparaba la celotipia de nuestros antepasados del Pleistoceno sólo hubiera operado cuando la infidelidad era ya un hecho consumado, habría sido demasiado tarde para evitar la penalización darwinista. No queda, pues, nada claro que los celos subsiguientes a la infidelidad ofrecieran una ventaja adaptativa para nuestros antepasados.

En cambio, vigilar cualquier factor que pudiera propiciar la traición tal vez sí fuera una estrategia eficiente. La infidelidad no suele producirse de repente, sin previo aviso. Cabe suponer que, antes de llegar a la cópula, nuestros antepasados —igual que los humanos de hoy— mostraban pequeñas dosis de interés sexual, emocional o de ambos, para llamar la atención del otro. No tenía por qué exigirse que varones y mujeres desarrollaran diferentes disparadores de los celos, pues, para ambos sexos, la forma más eficaz de impedir la infidelidad de su cónyuge consistía en mantener la guardia ante el flirteo. Esta hipótesis concuerda con las pruebas que muestran ausencia de diferencias sexuales en las respuestas innatas a las dos formas de infidelidad.

¿Qué ocurre en otros animales? La investigación comparada viene en nuestro auxilio para ahondar en la evolución de la conducta humana. Varios psicólogos evolucionistas han apoyado sus argumentos a favor del predominio en el varón de los celos sexuales, en la observación de lo que acontece en otras especies: el macho se ocupa de prevenir el apareamiento de su pareja cuando ésta se encuentra receptiva, es decir, cuando está en celo y puede concebir. En tales casos, el macho que persigue a una hembra para copular con ella debe impedir, al propio tiempo, que otros machos se le acerquen.

Sin embargo, existen divergencias notables entre los seres humanos y esas especies. En primer lugar, las mujeres muestran una sexualidad inusual: son físicamente capaces de mantener relaciones sexuales durante todo su ciclo reproductivo pero su celo permanece oculto, es decir, no ofrecen señales claras del período de máxima fertilidad. En segundo lugar, en muchas de tales especies, los machos no invierten recursos en cuidar de su prole, un factor clave en las teorías sobre el emparejamiento humano. Las propias aves monógamas, con marcada dedicación paterna, difieren de los humanos en varios aspectos; por citar un ejemplo: tienen nidadas, mientras que una mujer suele parir sólo un hijo.

Ahora bien, ¿y los primates? En su síntesis sobre la sexualidad de los primates, Alan Dixson, reseñaba en éstos enorme variabilidad de conductas sexuales y de emparejamiento. Los gibones son los únicos que establecen parejas monógamas. La hembra gibón persigue y echa fuera a cualquier otra hembra que invada su territorio, sin esperar a ver si muestra interés sexual o emocional por su compañero.

Teoría socio-cognitiva

Los celos constituyen uno de los recursos dramáticos más empleados por novelistas y guionistas. Pensemos en las clásicas comedias de enredo y en una de sus más repetidas escenas: marido (o esposa) recibe con gusto los halagos y atenciones de un desconocido (o desconocida) que hasta flirtea descaradamente con él (o ella); ello provoca tal enojo al cónyuge (en ocasiones escondido tras un florero) que empieza a comportarse de forma irracional y ridícula. Situaciones como ésta resultaban muy útiles para añadir un toque "picante" a la historia, sobre todo cuando la censura prohibía cualquier representación directa de la sexualidad. Una mera sonrisa coqueta o una mirada insinuante podían provocar un alud de situaciones absurdas.

Los teóricos de las emociones adscritos a una tendencia socio-cognitiva aportan una explicación simple y directa de los efectos que esas sonrisas pueden producir en la mente del cónyuge atormentado por los celos. Subrayan la importancia de la valoración cognitiva. En su opinión, la celotipia podría hallar su origen en la percepción de que un rival potencial constituye una amenaza para aquello que se tiene por valioso en uno mismo y en una relación.

Apoyado en la obra de Richard Lazarus, de la Universidad de California en Berkeley, cierto modelo

distingue entre *valoración primaria* y *valoración secundaria.* En la primaria, el individuo evalúa un evento en función de las consecuencias que le comporta: positivas, negativas o nulas. Si la valoración resulta negativa, trata de estimar el alcance de la amenaza y se dedica luego a la valoración secundaria, para afrontar las posibles adversidades.

Aplicado a los celos, sostengo que el mecanismo de valoración primaria podría activarse por un factor elemental: la interacción entre el ser amado y cualquier rival potencial. Tal relación recíproca entre dos 'otros' puede provocar una vaga sensación de amenaza, que no necesariamente debe percibirse de forma consciente; quizá se trate de una emoción innata, que puede darse en otros animales. Su función: motivar acciones que pongan fin a tan peligrosa "liaison". Al menos en los adultos humanos, otros factores entran también en juego: por ejemplo, el significado de esa infidelidad para uno mismo y para su relación. De todas estas valoraciones dependen la intensidad y la dirección de los celos.

Esta forma de entender la celotipia encaja en uno de los marcos teóricos que se emplean en el estudio del enfado y otras emociones sociales y "morales". (¿En razón de qué nos enfadamos? Imposible enumerar todas las causas; la respuesta depende de lo que cada individuo cree que se le debe en justicia.) Desde este punto de vista, las emociones cuentan con dos componentes: uno "primordial", inscrito en el sistema nervioso por la evolución, y otro "elaborado", que refleja normas y significados culturales.

Esta interpretación no se opone a la hipótesis de que los celos desempeñan una función adaptativa al asegurar las relaciones de pareja, que revisten suma importancia para ambos sexos. Por múltiples razones. Reflexionar sobre el significado y las causas de la infidelidad de un cónyuge puede considerarse adaptativo, pues ayuda a descubrir estrategias de conducta para fortalecer esta relación u otra futura.

Las teorías que describen la celotipia como un mecanismo psicológico general ofrecen una doble ventaja. Por un lado, acomodan con mayor facilidad el factor cultural; por otro, son extensivas a los celos que se dan fuera del contexto conyugal (por ejemplo, entre hermanos o entre amigos) y nos ahorran así tener que definir por separado emociones que, con frecuencia, resultan similares.

Ontogenia de los celos

En cuanto al origen de los celos, cabe la posibilidad de que surgieran fuera del contexto conyugal, en respuesta a la rivalidad entre hermanos, quienes desde la concepción compiten por hacerse con los recursos de sus progenitores. Andando el tiempo se habrían utilizado también para conservar amistades y parejas.

La rivalidad entre hermanos constituye un fenómeno común en el mundo animal. En el caso del águila negra con nidadas de sólo dos huevos, el aguilucho mayor mata, de forma instintiva, al más joven. No es un ejemplo único entre las aves. Sin embargo, el fratricidio parece ser potestativo; se produce sólo en ciertas ocasiones; así, cuando un pollo mayor no recibe alimento suficiente. El estudio de los mecanismos inmediatos (fisiológicos) que conducen a la rivalidad fraternal y a la competencia en otras especies, incluidos los primates, podría ayudar a comprender el origen de los celos humanos.

Puesto que los trabajos recientes centran su atención en las relaciones entre adultos, la investigación experimental sobre la ontogénesis de la celotipia está aún en mantillas. Hasta la fecha, los experimentos con niños se dedican a analizar los celos que provoca la llegada de un nuevo hermanito a la familia. El hijo mayor, que por lo común está en edad de empezar a andar, suele desplegar una gama de emociones negativas; a su vez, los padres a menudo se muestran menos positivos con él (muestran menos alegría y más confrontación) que con el nuevo vástago.

Aunque los cambios en la conducta de los progenitores contribuyen a la desazón del niño, resulta manifiesto que el mero hecho de dirigir la atención a su hermano pequeño provoca celos. El grupo encabezado por Sybil Hart, de la Universidad Politécnica de Texas, comprobó que los bebés de sólo seis meses de edad, que no tenían hermanos, mostraban expresiones faciales más negativas (fruncimientos del ceño y contracciones labiales) cuando su madre jugaba con un muñeco con aspecto de niño, que cuando lo hacía con un juguete sin rasgos humanos. En otro estudio, unos pequeños de ocho meses de edad trataron de distraer verbal y físicamente a sus madres para que éstas dejaran de prestar atención a otro niño.

De esas observaciones se desprende que un infante puede desarrollar la celotipia, al menos en una forma primitiva, sin la intervención de ningún razonamiento complejo. Después, con el desarrollo, ganan importancia los factores sociales y cognitivos. Ya en la edad preescolar, la aparición de los celos depende de las particularidades del triángulo social que forma el niño con su madre y el "competidor". A este respecto, Sonia Masciuch, de la Universidad de Alberta, y Kim Kienapple, de la Universidad de Monte San Vicente, comprobaron que los niños de cuatro años se mostraban más celosos cuando sus madres trataban con algún chiquillo de su misma edad que cuando trataban con uno menor. Los celos de los más pequeños, en cambio, no parecieron verse afectados por la edad del rival.

Pero, ¿ constituyen esas conductas infantiles una prueba de celotipia o bien manifiestan simplemente un tipo de ansiedad inespecífico? Algo similar se plantea en los estudios sobre el comportamiento adulto: ¿pertenecen los celos a una emoción básica, una mezcla de varias emociones negativas, o reflejan un elemento distintivo de una determinada situación social? Para resolver tales cuestiones, deberemos esperar a que los resultados de las diversas líneas de investigación converjan en una nueva concepción de la celotipia.

Conclusiones

La exploración de las raíces evolutivas de la conducta y las emociones proporciona un rico filón de hipótesis para la psicología. Sin embargo, la investigación aquí expuesta

sugiere que los celos causados por la infidelidad no muestran diferencias sexuales, al menos tan marcadas como algunos sugieren. Parece más probable que la selección natural configurara unos mecanismos celotípicos generales, diseñados para operar en diversos contextos interpersonales. Las diferencias entre hombres y mujeres, que sin duda las hay, reflejarían entonces diferencias en las valoraciones cognitivas, más que la existencia de un dimorfismo estructural arraigado en el cerebro. En suma, parece que el monstruo de los celos no hace distinción de sexo cuando penetra en el corazón de las personas —un monstruo que podría surgir primero en las mentes de los bebés, mucho antes de que emerjan el deseo sexual y el sentimiento amoroso.

La autora

Christine R. Harris imparte clases de psicología en la Universidad de California en San Diego, el mismo centro donde se doctoró en 1998. Su labor investigadora se centra en las emociones humanas. Estudia sus efectos en los procesos cognitivos y su componente social.

Bibliografía complementaria

PSYCHOPHYSIOLOGICAL RESPONSES TO IMAGINED INFIDELITY: THE SPECIFIC INNATE MODULAR VIEW OF JEALOUSY RECONSIDERED. C. R. Harris en *Journal of Personality & Social Psychology*, vol. 78, págs. 1082-1091; 2000.

SEX DIFFERENCES IN JEALOUSY: EVOLUTIONARY MECHANISM OR ARTIFACT OF MEASUREMENT? D. DeSteno, D. M. Bartlett, J. Braverman y P. Salovey en *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 83, págs. 1103-1116; 2002.

A CROSS-CULTURAL ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF WOMEN AND MEN: IMPLICATIONS FOR THE ORIGINS OF SEX DIFFERENCES. W. Wood y H. A. Eagly en *Psychological Bulletin*, vol. 128, págs. 699-727; 2002.

A REVIEW OF SEX DIFFERENCES IN SEXUAL JEALOUSY, INCLUDING SELF-REPORT DATA, PSYCHOPHYSIOLOGICAL RESPONSES, INTERPERSONAL VIOLENCE, AND MORBID JEALOUSY. C. R. Harris en *Pesonality and Social Psychology Review*, vol. 7, págs. 102-128; 2003.

Wolfgang Bürger

Sólo doce pasos hasta la eternidad

Contar: Quien quiera medir en un largo viaje el camino recorrido o contar la cantidad de pasos en una larga caminata, no deberá tener miedo de los grandes números. Las ruedas de una bicicleta de 26 pulgadas, que con neumáticos tienen un perímetro de unos dos metros, habrán girado ya unas mil veces alrededor de su eje en los dos primeros kilómetros de una excursión. Durante una marcha diaria de 25 kilómetros un caminante da unos 30.000 pasos (de unos ochenta centímetros de longitud). Los niños, con sus piernas más cortas, deben dar pasitos más a menudo.

Como todas las actividades monótonas, el contar cansa los sentidos. Por ello aconsejamos a los niños, que cada noche dicen no tener sueño todavía, que cuenten las ovejitas en un campo lleno de flores.

Desde hace ya muchas generaciones vienen los ingenieros reflexionando sobre cómo se podría evitar el cansancio de contar. Inventaron odómetros mecánicos que, dentro de las posibilidades de su tiempo, registraban la longitud del camino haciendo rodar una rueda medidora sobre el suelo. Los descendientes de esos aparatos encuentran utilidad todavía hoy en el deporte y nos recuerdan su larga historia, que podemos remontar hasta Vitruvio (hacia 84-26 a.C.) y Herón de Alejandría (vivió en el primer siglo de nuestra era). Los odómetros modernos se distinguen de sus antepasados más por su forma de registrar los resultados que por la técnica de medir.

¿Con qué exactitud miden esas ruedas de medición? Recorrerán una desigualdad grande del terreno (mayor que su diámetro $2r$) escrupulosamente, así que en caso de que se la encuentren medirán un camino más largo que el directo. Pero también con pequeñas desigualdades sobreestiman el camino; en el recorrido total sumarán el arco s de la rueda en vez de la longitud l sobre la que se tienda la desigualdad. La prolongación relativa del camino $(s - l)/l$ es, en primera aproximación, igual a $(l/r)^2/24$. Resulta despreciable cuando la rueda es grande ($r \gg l$).

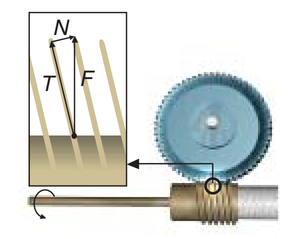
Odómetros y podómetros: El odómetro de Vitruvio ya registraba el camino con una gran desmultiplicación. Al cabo de una vuelta completa de la rueda de medición, una pestaña hacía avanzar un diente a una rueda con $N = 400$ dientes instalada en un eje vertical. Sólo después de que esta rueda dentada hubiese girado una vuelta completa, caía desde un recipiente una piedra redonda a otro contendor de bronce, siempre en el vehículo medidor. Para un cálculo aproximado, tomemos las millas como $M = 1500$ metros. El radio de la rueda de medición deberá tener $r = M/2\pi N$ o 0,60 metros si cada piedrecita debe corresponder a una milla del camino. Acabado el viaje, había que contarlas.

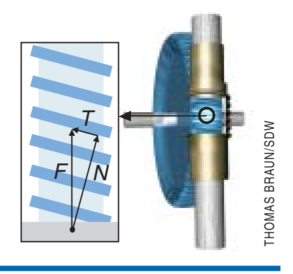
Nos faltan detalles exactos del odómetro de Herón. De la descripción en el bonito libro "La Máquina", de Sigvard Strandh, se desprende que el movimiento de la rueda medidora se reducía cuatro veces gracias a unos engranajes de tornillos sin fin. Con una relación desmultiplicadora q en cada fase de la reducción, el aparato recorría un camino $W = 2\pi r q^{-4}$ antes de que cayera la siguiente bola de piedra en el recipiente. En el caso de que la rueda medidora de Herón tuviera el mismo radio r que la de Vitruvio y fuera $q = 1{:}20$, cada bola de piedra registraría un recorrido de más de 600 kilómetros. Los engranajes de tornillos sin fin permiten desmultiplicaciones increíblemente grandes.

Para una caminata, el odómetro —del que había que tirar como de una carretilla, según las descripciones antiguas— resulta muy pesado. De ahí que excursionistas y corredores lleven podómetros de bolsillo. Cada paso que se dé saca en un aparato de éstos de su posición de reposo, donde lo mantiene su inercia, a un péndulo afinado "subcríticamente" (tal, que su frecuencia propia sea mucho menor que la frecuencia de los pasos, para que los siga sin retrasarse). Un muelle lo devuelve a la posición de partida y un mecanismo de control transfiere al contador el nuevo paso.

Engranajes de tornillo sin fin

Una rueda dentada y un tornillo, que giren sobre dos ejes perpendiculares entre sí, sólo se podrán mover si resbalan la una sobre el otro. La fuerza F generada se descompone en la fuerza normal N, perpendicular a la rosca (que recuerda a las fuerzas de adherencia o de fricción), y la fuerza tangencial T, en la dirección de la rosca (que puede vencer las fuerzas de adherencia o de fricción). Mientras T sea menor que una cierta parte de N ($T \leq \mu_0 N$; μ_0, coeficiente de adherencia), el engranaje bloqueará el movimiento por autorretención. Esta se produce regularmente, por el pequeño ángulo de paso de la rosca, cuando se tiene que mover el tornillo sin fin mediante el giro de la rueda dentada. Al revés, siempre es posible vencer la adherencia gracias a las pequeñas inclinaciones del tornillo y poner en movimiento la rueda dentada por medio del giro de éste.





THOMAS BRAUN/SDW



TECHNORAMA WINTERTHUR

Máquina para la eternidad de Arthur Ganson: la última rueda dentada necesita teóricamente 2,32 billones de años para dar una vuelta.

Del número de pasos se deduce la longitud del camino multiplicándolo por la longitud del paso; en el podómetro se ha introducido previamente el correspondiente factor de conversión. El proceso sólo es útil hasta cierto punto, porque la longitud del paso varía con el cansancio del excursionista y la pendiente del camino.

Caminos de agua: ¿Cómo se mide un recorrido sobre el agua? Vitruvio pensó en medir la velocidad de los barcos con las ruedas de paletas, que girarían debido al movimiento relativo del agua con respecto al barco (venía a ser su mecanismo como una clepsidra, que mide la corriente de agua que fluye por un conducto). Como un barco desplaza agua y le rodea por eso una corriente propia, mejor será medir su velocidad respecto a un objeto flotante y alejado, en aguas ya más tranquilas. Pero esta idea sólo la encontramos a finales de la Edad Media, en los escritos del cardenal Nicolás de Cusa (1401–1464), versado en muchas disciplinas, o en las "Famosas hojas de la Técnica", de Franz Maria Feldhaus.

La idea se materializó más adelante en la corredera, que mediría en los viajes marinos la velocidad del barco. Como referencia más antigua a ese artilugio, el libro de Ludwig Darmstädter "Manual de Historia de las Ciencias y la Técnica" nombra a un tal William Bourne y el año 1577. Largando el cabo, se deja la barquilla de madera lastrada con plomo de la corredera a la deriva, hasta que llega a aguas tranquilas detrás del barco. Para medir la velocidad de éste, el marino cuenta los nudos mientras el cabo pasa por sus manos. Al calibrar la corredera (sin olvidar la velocidad propia de la barquilla, que le es impartida por la tensión de la cuerda, en equilibrio con la resistencia del agua), se le hacen los nudos al cabo de tal manera que el número contado en 14 o 28 segundos, los que tarda un reloj de arena en vaciarse, dé exactamente las millas náuticas que recorrería el barco en una hora. Aún hoy, los marinos hablan de "nudos" cuando en realidad se refieren a millas náuticas por hora.

"Máquina para la eternidad": Arthur Ganson, artista cuyas esculturas son a la vez máquinas, ha llevado a sus últimas consecuencias, hasta el absurdo, el odómetro de Herón. En vez de con cuatro pasos de reducción, ha montado uno con doce en el Technorama de Winterthur, el museo de la técnica de Suiza; lo llaman "máquina granítica". El eje gira movido por un motor eléctrico con $\omega = 200$ vueltas por minuto. Con la reducción a razón de $q = 1{:}50$, la primera rueda dentada tarda en una vuelta completa $1/(\omega q) = 15$ segundos. Unido firmemente al mismo eje que esta rueda dentada hay un tornillo sin fin; mueve con la misma reducción q una segunda rueda dentada, que necesita $1/(\omega q^2)$, ya 12,5 minutos, para una vuelta completa. El juego se realiza aún diez veces más hasta la última rueda dentada, la duodécima, que necesitaría para una vuelta $T = 1/(\omega q^{12})$, 2,32 billones de años. Hay que emplear ese condicional, pues T es un tiempo enormemente grande: 169,3 veces la edad del universo, que según nuestras estimaciones actuales tiene 13.700 millones de años. El último eje puede hundirse en hormigón o (como en el Technorama) atornillarse fuertemente a un bloque de granito: mientras el mundo exista, antes de esa eternidad, la rueda apenas girará.

Juan M.R. Parrondo

Más sobre el reparto de poder

En los Juegos Matemáticos de agosto tratamos aspectos matemáticos del reparto de poder. Un problema con ciertas implicaciones en un asunto polémico como es el de las normas que la futura Constitución Europea propone para la toma de decisiones: la famosa *doble mayoría*. En aquel artículo analizamos el tema con cierto detalle, pero algunos lectores me han enviado preguntas y comentarios que merecen que volvamos a dedicarle una nueva entrega.

Recordemos que el *índice de Banzhaf* es una forma de medir el poder de un votante en un consejo que sigue un sistema de votación ponderado, es decir, un sistema en el que cada votante tiene un número de votos distinto. Se calcula a partir de las coaliciones que pueden formar los votantes del consejo. Si hay N votantes, el número de coaliciones que pueden formar (incluyendo la totalidad del consejo y la coalición vacía) es 2^N. De ellas, algunas serán ganadoras, es decir, capaces de sacar adelante una resolución, y otras son perdedoras. Decimos que un votante es *indispensable* en una coalición ganadora si, al abandonarla, ésta se convierte en perdedora. El índice de poder de Banzhaf de un votante x es proporcional al número ω_x de coaliciones en las que el votante es indispensable, que se llaman *coaliciones decisivas*. Más precisamente, el índice es igual a la probabilidad de que el votante sea indispensable en una coalición elegida al azar de entre todas las que el votante puede formar con sus compañeros. Como hay 2^{N-1} coaliciones que contienen a x, el índice de poder de Banzhaf será

$$\eta_x = \frac{\omega x}{2^{N-1}}.$$

En aquel artículo, calculamos el índice de poder de Banzhaf de un ciudadano que vota en un país con N habitantes, suponiendo N par y que las resoluciones se aprueban por mayoría simple. Este ciudadano será indispensable sólo en las coaliciones en las que él esté y que tengan exactamente $N/2+1$ individuos. Con algo de combinatoria se puede demostrar finalmente que el índice de Banzhaf del ciudadano es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de N.

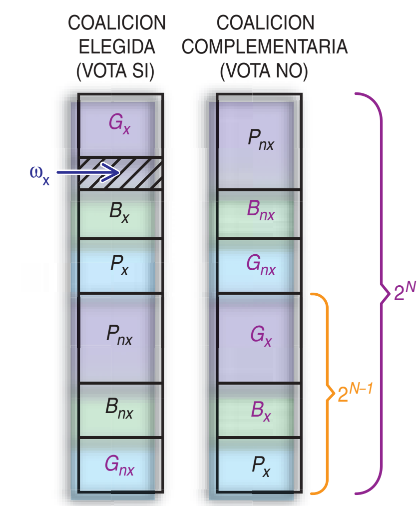
Esta dependencia con N es una de las justificaciones de la llamada norma Penrose-62, propuesta por los matemáticos polacos Slomczynki y Zyczkowski, y que consiste en dar a cada país un voto en el Consejo de Ministros de la Unión proporcional a la raíz cuadrada del número de sus habitantes y establecer una cuota (número de votos mínimos para aprobar una resolución) del 62 % de los votos totales. Con esta regla los índices de Banzhaf de todos los ciudadanos europeos serían aproximadamente iguales.

Algunos lectores han mostrado su disconformidad con este argumento, puesto que se basa en las coaliciones decisivas o coaliciones en las que el ciudadano es indispensable. Estas coaliciones deben tener exactamente $N/2+1$ individuos, lo cual las hace altamente improbables. ¿Es entonces válido un argumento que se sustenta sobre coaliciones que nunca se van a dar en la práctica?

La objeción no se sostiene porque las coaliciones decisivas son sólo un modo de presentar la definición del índice de Banzhaf. Hay sin embargo otras propiedades del índice en las que las coaliciones decisivas no son importantes. Veamos una de ellas.

Supongamos un individuo x en un consejo con N votantes. Como ya hemos mencionado, existen 2^N coaliciones posibles entre miembros del consejo. Tomemos una de ellas al azar y supongamos que la coalición elegida vota afirmativamente una resolución y el resto de los miembros del consejo votan en contra. ¿Con qué probabilidad nuestro individuo x se encontrará en el bando que gana la votación?

En la figura se esquematiza esta situación con todos los casos posibles. La coalición elegida, que vota afirmativamente, puede ser de varios tipos: ganadora (G), perdedora (P) o de bloqueo (B). Una coalición ganadora es la que gana si vota afirmativamente, una coalición perdedora es la que pierde si vota tanto afirmativa como negativamente y una coalición de bloqueo es la que gana si vota negativamente y pierde si vota afirmativamente. Esta distinción es necesaria siempre que las votaciones no se ganen por mayoría simple. Por ejemplo, si en un consejo de 50 votos sólo se aprueban las resoluciones que tienen 30 o más votos afirmativos y hay dos coaliciones enfrentadas, cada una de ellas con 25 votos, la que vota afirmativamente pierde y la que vota negativamente gana. Ambas son coaliciones de bloqueo: no son capaces de sacar adelante resoluciones, pero sí son capaces de bloquearlas. Aunque las coaliciones de bloqueo ganan las votaciones cuando votan negativamente, reservamos la denominación "coalición ganadora" únicamente para aquellas que pueden sacar adelante resoluciones. Son sólo estas coaliciones ganadoras las que se tienen en cuenta en el cálculo del índice de Banzhaf. Como se puede observar en la figura, si una coalición es ganadora, su complementa-



ria será perdedora; mientras que si una coalición es de bloqueo la complementaria será también de bloqueo. Finalmente, con el subíndice x denotamos las coaliciones a las que pertenece el individuo x y con nx aquellas a las que no pertenece.

De acuerdo con la figura, nuestro individuo x está en la coalición que gana la votación en los tres casos siguientes: cuando está en la coalición elegida y ésta es ganadora, es decir, cuando la coalición elegida es G_x; cuando no está en la coalición elegida y ésta es perdedora, es decir, cuando la elegida es P_{nx}; y, finalmente, cuando no está en la coalición elegida y ésta es de bloqueo, es decir, cuando la elegida es B_{nx}. Por tanto, la probabilidad de estar en el bando ganador es:

$$P_{ganar} = \frac{G_x + P_{nx} + B_{nx}}{2^N} = \frac{G_x + 2^{N-1} - G_{nx}}{2^N}$$

en donde hemos utilizado que $P_{nx} + B_{nx} + G_{nx} = 2^{N-1}$, algo que puede comprobarse fácilmente en la figura. Podemos ahora relacionar estos números con el número de coaliciones decisivas, ω_x. Para ello, tomemos una de las G_x coaliciones ganadoras que contienen a x. Si x se retira de la coalición, hay dos posibilidades: a) que la coalición siga siendo ganadora, con lo que, después de retirarse x, se convertiría en una de las G_{nx} coaliciones ganadoras que no contienen a x; o b) que deje de ser ganadora, con lo que la coalición de partida sería decisiva. De aquí se deduce que $G_x = \omega_x + G_{nx}$. Introduciendo esta relación en la fórmula anterior y recordando la definición del índice de poder de Banzhaf, obtenemos:

$$P_{ganar} = \frac{2^{N-1} + \omega_x}{2^N} = \frac{1 + \eta_x}{2}.$$

Esta fórmula relaciona el índice de poder de Banzhaf con la probabilidad de estar en el bando que gana la votación. Nos proporciona, por tanto, un nuevo significado del índice, en el que las coaliciones decisivas no desempeñan ningún papel.

Veamos ahora qué ocurre en una votación de dos niveles, es decir, una votación en la que un consejo está compuesto por representantes de distintos países. Si un ciudadano x del país p tiene un índice de poder η_x dentro de su país y el país tiene un índice η_p en el consejo, y suponiendo que el representante acata la decisión de la mayoría de los ciudadanos de su país, ¿cuál es la probabilidad de que dicho ciudadano esté en el bando ganador de una votación en el consejo, tomando al azar coaliciones dentro de los países? Se pueden dar dos casos: a) que el ciudadano esté en el bando ganador de su país y su representante esté en el bando ganador del consejo, o b) que el ciudadano esté en el bando perdedor de su país y su representante esté en el bando perdedor del consejo. De acuerdo con lo que hemos deducido previamente, la posibilidad a) ocurre con una probabilidad:

$$\frac{1 + \eta_x}{2} \times \frac{1 + \eta_p}{2}.$$

Por otro lado, la posibilidad b) ocurre con probabilidad:

$$\frac{1 - \eta_x}{2} \times \frac{1 - \eta_p}{2}.$$

Sumando ambas probabilidades obtenemos la probabilidad de estar en el bando ganador, que resulta ser:

$$P_{ganar} = \frac{1 + \eta_x \eta_p}{2}$$

es decir, recuperamos la misma fórmula que obtuvimos para una votación de un nivel pero con un índice de poder efectivo igual al producto de los índices de poder de los dos niveles. Por esta razón, si η_x es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la población del país, η_p debería ser directamente proporcional a la raíz cuadrada de dicha población, que es lo que propone la norma *Penrose-62*.

Aunque la norma Penrose-62 sale airosa de la objeción de las coaliciones decisivas, existen otras críticas más sólidas. El punto más frágil del índice de poder de Banzhaf es la hipótesis de que todas las coaliciones son igualmente probables. Esta hipótesis es equivalente a que cada votante elige su voto, afirmativo o negativo, al azar y con probabilidades respectivas del 50 %. Es una hipótesis plausible, ya que, al no tener ninguna información acerca de las posturas de los votantes, la equiprobabilidad parece ser la única elección posible. El problema es que el cálculo del índice de Banzhaf es extremadamente sensible a la probabilidad con la que cada individuo elige su voto. Por ejemplo, si en un país los ciudadanos votan afirmativamente con una probabilidad del 52 % y negativamente con el 48 %, el índice de poder de cada uno de ellos resulta ser inversamente proporcional al número de habitantes y no a su raíz cuadrada. Gelman, Katz y Bafumi, matemáticos de la Universidad de Columbia y del Instituto Tecnológico de California, han realizado un cuidadoso estudio acerca del poder real de los votantes en distintas elecciones de los Estados Unidos y concluyen que el índice de poder real está más próximo al inverso de la población que al inverso de su raíz cuadrada. De acuerdo con estas investigaciones, las formas de representación habituales, que dan un número de votos proporcional al número de habitantes, son más justas que la norma Penrose-62.

Como ven, no hay unanimidad entre los investigadores acerca de los modos de representación más justos. Es un problema que aún sigue abierto. El proyecto de Constitución Europea basa el sistema de decisión en la *doble mayoría*, que, en lo que respecta al poder de cada país en el Consejo, es similar al modo de representación tradicional, proporcional a la población y no a su raíz cuadrada. En mi opinión, es más prudente esta postura que la aplicación de una norma novedosa e interesante como la Penrose-62, pero que aún no cuenta con una total aceptación en la comunidad científica. Finalmente, conviene también recordar que el sistema de la doble mayoría tiene un importante significado político que difícilmente pueden recoger los formalismos matemáticos: la idea de que los dos pilares sobre los que se construye la Unión Europea son los ciudadanos y los estados.

parr@seneca.fis.ucm.es

LIBROS

Utiles matemáticos

Tablas

THE HISTORY OF MATHEMATICAL TABLES. FROM SUMER TO SPREADSHEETS. Dirigido por M. Campbell-Kelly, M. Croarken, R. Flood y E. Robson. Oxford University Press; Oxford, 2003.

ASTRONOMY IN ORIENT AND OCCIDENT. SELECTED PAPERS ON ITS CULTURAL AND SCIENTIFIC HISTORY, por Yasukatsu Maeyama. Georg Olms Verlag; Hildesheim, 2003.

THE ALFONSINE TABLES OF TOLEDO, por José Chabás y Bernard Goldstein. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, 2003.

JOHANNES DE TINEMUE'S REDACTION OF EUCLID'S ELEMENTS. THE SO-CALLED ADELARD III VERSION. Introducción, siglas y descripción de los manuscritos con anotaciones comentadas y aparato crítico de H. L. L. Busard. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 2001.

Hay un hilo de continuidad conceptual que se extiende desde las primeras expresiones numéricas acuñadas en arcilla hasta la computación y manipulación de la información de nuestros días: las tablas. Lo mismo que en el caso de la escritura o la moneda, apenas si reparamos en lo que han significado para el progreso de la humanidad. Por fin, han merecido la atención de los estudiosos, que exponen sus hitos principales en *The History of Mathematical Tables*. Apartado principal de ese campo de inquisición lo constituyen las tablas astronómicas, de especial cultivo en nuestra nación (*The Alfonsine Tables of Toledo*) aunque con raíces profundas en el tiempo y en el espacio (*Astronomy in Orient and Occident*) y enmarcadas en una renovación de la matemática en el Medievo (*Johannes de Tinemue's Redaction of Euclid's Elements. The So-Called Adelard III Version*.)

Parece conveniente acotar en cuatro etapas la evolución de las tablas. Una primera, de invención y aplicación a fines diversos, abarcaría desde el 2600 a.C. hasta el 150 d.C. La tablilla más antigua procede de la ciudad sumeria de Shuruppag. Las tablas mesopotámicas constaban de dos ejes de organización: a lo largo del horizontal se anotaban diferentes tipos de información numérica; a lo largo del eje vertical, los datos concernientes a individuos. Las había, sin embargo, que sólo tenían un eje de cálculo, el vertical. Cálculo y organización tabulares proceden de izquierda a derecha y de arriba abajo, siguiendo la dirección de la escritura cuneiforme. Un 97 por ciento de las tablillas de ese período pertenece al ámbito administrativo.

Sigue una segunda etapa, de creación de tablas astronómicas y trigonométricas, fase que preparó el terreno para el advenimiento de la revolución científica. La tercera comprende desde comienzos del siglo XVII hasta mediados del siglo XIX. En 1614 John Napier hacía pública su invención de los logaritmos en *Mirifici logarithmorum canonis descriptio*. Cuando Henry Briggs, autor de la primera tabla de logaritmos en base 10, dio a la imprenta, en 1633, su *Trigonometria Britannica*, los logaritmos habían alcanzado su mayoría de edad: el estilo un tanto obscuro de Napier se había transformado en un procedimiento cristalino cuya utilidad no sería superada hasta la calculadora electrónica. Gracias a esas tablas pudieron satisfacerse los problemas de cálculo que comportaba otra revolución, la industrial. A esa etapa le sucede la actual, de refinamiento y extensión, cuyo postrer avance lo encontramos en las tablas dinámicas de nuestros ordenadores.

Aunque todas las tablas facilitan la selección, categorización, cálculo, contrastación y extracción de datos, se aplican a fines distintos. Mas, se destinen a fines astronómicos, administrativos (piénsese en los catastros) o industriales (tablas de normalización, tablas de conversiones, etcétera), su construcción ha sido, casi siempre, una tarea comunitaria. Se trata, además, de un trabajo que se caracteriza por la continuidad. Dan fe de ello las astronómicas.

Las tablas astronómicas aportan los medios para computar las posiciones del Sol, la Luna y los planetas en un momento determinado. Se fundan en una teoría sobre el movimiento planetario y parámetros orbitales fundamentales, la excentricidad por ejemplo. En la teoría ptolemaica se basaron las Tablas Alfonsíes; en la copernicana, las Tablas Pruténicas, y en el sistema de Tycho Brahe las Tablas Danesas de Longomontanus. A partir de las tablas se calculan las efemérides, que nos ofrecen las posiciones geocéntricas diarias del Sol, la Luna y los planetas. Para cada teoría planetaria, los períodos medios de los planetas y sus correspondientes longitudes medias resultan decisivos.

Claudio Ptolomeo (*c*. 85-165) preparó en la biblioteca de Alejandría su *Syntaxis* o *Almagesto*, que sistematizó el pensamiento astronómico de su tiempo. Seleccionó las tablas allí introducidas, las revisó y las compendió con instrucciones de uso en unas *Tablas manuales*. Se tradujeron del griego al latín, árabe, persa y sánscrito; tuvieron una difusión incluso mayor que el propio *Almagesto*. ¿En qué estado se hallaba la astronomía en ese período helenístico? Reconocido experto en los sistemas del XVII, Yasukatsu Maeyama ha realizado incursiones muy valiosas de astronomía comparada de la antigüedad oriental y occidental.

Página del manuscrito sobre los cánones. Real Academia de Historia MS 9/5707.

Compartían un común interés por la comprensión de los fenómenos recurrentes y variables de los cielos. Importaba, pues, medir tales periodicidades en días solares, unidad de tiempo fundamental para el hombre, que se desenvuelve por ritmos circadianos. En el largo proceso recorrido para alcanzar una determinación precisa de los períodos, los astrónomos orientales y occidentales evidenciaron convergencias y discrepancias notables. Por ceñirnos a tres conceptos nucleares: la paralaje, la precesión de los equinoccios y la geometría.

La paralaje es un concepto griego. Cada observador se encuentra instalado en un sistema complejo de múltiples movimientos; debe, por tanto, concentrarse en un punto de referencia, cuya elección depende del objeto a contemplar. Así, para conocer el movimiento de un planeta, hemos de atender al punto estándar de referencia, el centro de la Tierra; tal reducción se hace por medio de la razón del radio de la Tierra a la distancia del cuerpo celeste, y en eso consiste la paralaje, que, definida en general, describe el ángulo entre las direcciones hacia un objeto cercano cuando se observa desde dos posiciones distintas. Ptolomeo determinó una paralaje solar horizontal de unos tres minutos. Comparado ese valor con el actual, de 8,8", el valor de Ptolomeo yerra en un factor de 20. Ello no impidió que se aceptara a lo largo de milenio y medio, es decir, hasta Newton. La ausencia del concepto de paralaje en Oriente significa que falta el punto fundamental de referencia en el sistema observacional. Por tanto, aunque no se deba dudar de la corrección de sus observaciones, su validez quedaba circunscrita a un tiempo y un lugar determinados.

El cambio del firmamento en virtud de la precesión de los equinoccios procede con parsimonia tal, que sólo puede descubrirse si se dispone de dos o más observaciones correspondientes a épocas distintas. Se atribuye a Hiparco su identificación. Lo mismo que sucedió con la paralaje, los chinos no alcanzaron a reconocer la función del tiempo: no redujeron los cambios manifiestos a una referencia fundamental de observación, esto es, a la función del tiempo. Ello explica que tardaran siglos en descubrir el fenómeno de la precesión de los equinoccios.

Abundan las interpretaciones de corte filosófico que resaltan la incidencia de la geometría en la astronomía griega, en comparación con su repercusión mínima en otras regiones del mundo. No parece responder a la verdad tal apreciación. Para deducir períodos medios exactos, chinos y babilonios tenían que operar, no con el movimiento uniforme continuo y abstracto de los cuerpos celestes (caso de los griegos), sino con puntos particulares numéricamente definidos. La determinación de los períodos astronómicos convergía monótonamente en un punto, el período medio preciso. A eso obedece que los babilonios se mostraran rigurosos en su astronomía cuantitativa. En cambio, los griegos se apoyaron en la media geométrica, empleada de forma axiomática, para reproducir los movimientos circulares y eternos del firmamento.

Sobre ese trasfondo, que abarcaba la influencia hindú, en el siglo IX labró al-Khwarizmi, padre del álgebra, su *zij*, es decir, su colección de tablas astronómicas y cánones o

instrucciones asociadas. (Adelardo de Bath lo tradujo al latín a comienzos del siglo XII.) Con esa tradición hindú convivió en el Medievo la herencia helenista del *Almagesto* y las *Tablas manuales*, de Ptolomeo, que giraba en torno a la figura de al-Battani. Ambas se entremezclaron en numerosas ocasiones, como evidencian las tablas de Ibn al-Kammad para la latitud lunar, una tabla con un parámetro ptolemaico y otra con un parámetro hindú. En la segunda mitad del siglo XI se compilaron las *Tablas Toledanas*, parte de las cuales procedían de la obra de al-Battani, al-Khwarizmi y otros. Las *Tablas Toledanas*, adaptadas a distintos lugares, gozaron de amplia popularidad en Europa hasta el siglo XIV.



El hombre ha venido usando tablas numéricas desde hace cuatro milenios.

Otra obra comunitaria fueron las *Tablas Alfonsíes*. Sobre éstas, Chabás y Goldstein han tejido una documentada edición que trasciende el mero interés histórico-crítico para traer al lector los primeros vagidos de la ciencia en lengua española e introducirle con encomiable claridad en las nociones fundamentales de la astronomía de la baja Edad Media. Confeccionado en torno al año 1272, del *zij* alfonsí sólo nos han llegado los cánones, impresos en el siglo XIX por Manuel Rico Sinobas en una edición muy deficiente. El rey Alfonso (1221-1284) congregó en Toledo un grupo de eruditos judíos cuyo conocimiento de la lengua árabe les permitía absorber el opulento legado astronómico de al-Andalus. Dirigidos por Isaac ben Sid y Kudah ben Mosesha Cohen, en la construcción de las tablas y cánones no se limitaron a una mera traducción del material disponible. Corrigieron errores, así de Azarquiel, cuya sombra planea sobre el trabajo; realizaron observaciones más refinadas con instrumentos de nuevo cuño y observaron el curso del Sol a lo largo de un año. Afirman haber contemplado las posiciones del Sol en los equinoccios y solsticios y en los puntos octantes a medio camino entre ellos.

Entre los primeros años ochenta del siglo XIII y el cuarto inicial de la centuria siguiente, en el marco de intensas relaciones diplomáticas entre las corona de Castilla y la de Francia, llegaron a París.

La exposición que de las tablas ofrecían los cánones se desarrollaba a través de un prólogo y varios capítulos: cronología, trigonometría y rotación diaria, movimientos medios, ecuaciones, latitud, visibilidad planetaria y retrogradación, velocidades planetarias y lunares, sizigios y eclipses, visibilidad del creciente lunar, domificación y astrología, ecuación del tiempo, trepidación. En París se tradujeron al latín poco después de 1320. Desplazaron a las Toledanas y fueron, a su vez, sustituidas por las Tablas Pruténicas.

La geometría griega había entrado con fuerza en el mundo cristiano con la traducción de los *Elementos* de Euclides, una cuestión a la que Busard ha dedicado varios trabajos solventes, comentados ya en la revista. De hecho, una de las primeras obras en ser traducidas del árabe al latín en el esplendor del siglo XII fue el tratado euclidiano completo, incluidos los apócrifos libros XIV y XV. Con suma probabilidad, Adelardo de Bath fue el primero en realizar, quizás en el segundo cuarto del siglo XII, una versión íntegra. (Con anterioridad había construido un astrolabio.) A esa traducción de Adelardo se la conoce por AI. Vendría luego la traducción de Hermann de Carinthia; de acuerdo con la crítica, una versión basada en la edición árabe de Hajjaj. La tercera traducción de los *Elementos*, del árabe al latín, la acometería Gerardo de Cremona, quien se caracterizaba por su extrema literalidad, como se evidencia en su versión del *Almagesto*. Además de las traducciones árabo-latinas, se produjo, en el mismo siglo XII y en Sicilia, una traslación directa a partir del griego. Al parecer el texto se basa en la redacción griega de los *Elementos* que preparó en el siglo IV Theón de Alejandría.

La así llamada versión II fue, con mucho, el texto de Euclides más popular y más difundido en el Occidente latino a lo largo de los siglos XII y XIII. No es una traducción propiamente dicha. Según Busard, el autor se sirvió de un texto árabe junto con otros latinos (Adelardo de Bath, Hermann de Carinthia y la así llamada *Geometria II* del Pseudo-Boecio). La versión del texto de Euclides que se convirtió en canónica en la Edad Media y que se imprimiría en el Renacimiento fue la de Campanus, que se compuso poco antes de 1259. Aunque se da por cierto que ésta se basa en la Versión II, ello sólo es verdad para las definiciones, postulados, axiomas y enunciados, pero no lo es para las pruebas de la obra de Euclides.

La versión III es atribuida por Clagett a Adelardo y por Knorr a John de Tynemouth (o John de Londres). El análisis filológico y estructural de la misma revela que se compuso sobre la versión II. Además no pudo realizarla Adelardo. En efecto, se mencionan los *Analíticos Posteriores* de Aristóteles, traducidos por Gerardo tras la muerte del de Bath. Esa tercera versión comparte notables afinidades con el *De curvis superficiebus*, un tratado, atribuido a Johannes de Tinemue, en diez proposiciones que presenta un epítome de las pruebas de Arquímedes sobre la medición de las superficies y volúmenes de los conos, los cilindros y las esferas. Del análisis interno se desprende una misma autoría para ambas obras.

—LUIS ALONSO

...DE NOVIEMBRE 2004



ESPECIAL MONOGRAFICO



NUESTRO EINSTEIN COTIDIANO, por Philip Yam

Orientarse con un GPS, colgar un cuadro con un nivel de láser, fotocopiar: se lo debemos a Einstein.

LA CONSTANTE COSMOLOGICA, por Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner

Una nueva encarnación de la constante cosmológica de Einstein puede señalar el camino para superar la relatividad general.

LA BRUJULA DE EINSTEIN, por Peter Galison

El electromagnetismo de una barra imantada desvió la atención de Einstein mientras perfeccionaba la teoría de la relatividad general. ¿Por qué?

EL PAISAJE DE LA TEORIA DE CUERDAS, por Raphael Bousso y Joseph Polchinski

La teoría de cuerdas predice que el universo ocupa quizás un “valle”, al azar, de una infinidad de valles en un vasto “paisaje” de posibilidades.

EINSTEIN Y LOS COMIENZOS DE LA FISICA CUANTICA: DE LA OSADIA AL DESENCANTO, por Luis Navarro Veguillas

Einstein consideró *revolucionarias* algunas de sus ideas sobre la física cuántica. Un calificativo que no empleó en ninguna otra ocasión; ni siquiera al referirse a su teoría de la relatividad. Pero su osadía no le condujo al éxito pleno, sino al desencanto final.



VIOLACIONES DE LA RELATIVIDAD, por Alan Kostelecký

En pos de indicios experimentales de cuál pueda ser la teoría final del universo, se buscan violaciones del hasta ahora intocable principio de equivalencia de Einstein.

...Y MAS